

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Análise das potencialidades da geotermia em Portugal para aproveitamento a baixa temperatura

Álvaro José Silva Pereira



FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Ana Isabel Palmero Marrero

14 de Fevereiro de 2019

Análise das potencialidades da geotermia em Portugal para aproveitamento a baixa temperatura

Álvaro José Silva Pereira

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Resumo

A ascensão das preocupações ambientais, juntamente com a consciência da reação em cadeia das atividades humanas, traz mais do que nunca a necessidade urgente de explorar todas as possibilidades para reverter a condição recente do planeta. Além do investimento em fontes renováveis, como as fornecidas pelo sol, com a exploração das tecnologias eólica, fotovoltaica e hidroelétrica, ainda é preciso estar ciente de que precisamos melhorar o *mix* energético da nossa fonte e continuar pesquisando novas soluções.

A energia geotérmica surge como uma possível resposta e exige mais atenção. Nesta dissertação são compilados os conceitos e definições atuais sobre esta fonte e as tecnologias de sucesso. Também é explorada a situação da Europa em relação aos recursos geotérmicos e, mais especificamente, a posição de Portugal em relação a este tópico, quer seja nas suas instalações atuais, quer em possíveis melhorias.

A fim de alcançar novos resultados e desenvolver os conhecimentos atuais relevantes para as aplicações geotérmicas, estuda-se o desempenho de um sistema de bomba de calor de fonte terrestre (GSHP) aplicado a uma monozona pré-definida. O sistema é composto pela monozona, o sistema de controlo de temperatura, uma bomba de calor geotérmica água-água e o permutador de calor terrestre. A aplicação de um sistema de bomba de calor geotérmica água-água por forma a realizar climatização através de AVAC apresenta maior necessidade de componentes, nomeadamente não apenas a bomba de calor geotérmica como permutadores de calor água-ar o que reduz a eficiência do sistema como um todo. O controlo de simulação é um fator preponderante na interpretação de dados resultantes da simulação. Os valores impostos de condicionamento foram satisfatoriamente garantidas, nomeadamente os valores da temperatura de conforto. A temperatura máxima registada na monozona modelo foi de 25.67 °C em outubro e a temperatura mínima foi 19.64 °C em janeiro. A bomba de calor geotérmica apresentou um COP anual de 5.87 e EER (adimensional) de 8.35. A potência térmica debitada foi satisfatória para cumprir as necessidades. O permutador de calor terrestre utilizado foi um permutador de calor vertical fechado e em série. A profundidade de perfuração seleccionada foi de 78 m e designadas duas perfurações. A temperatura do solo manteve-se relativamente estável.

Palavras-chave: Energias Renováveis; GSHP; Bomba de calor geotérmica; Bomba de calor água-água; Permutador de calor terrestre; TRNSYS

Abstract

The rise of the environmental concerns along with the awareness of the chain reaction of Human's activities brings more than ever the urgent need to explore all the possibilities in order to reverse the recent condition of the planet. Besides the investment on renewable sources such as the ones provided by the sun, with the exploitation of eolic, photovoltaic and hydroelectric technologies one must still be aware that we need to improve our source's energetic mix and continue to research new solutions.

Geothermal energy arises as a possible answer and demands more attention. On this work it is compiled the current concepts and definitions regarding this source and the successful technologies. Also is explored Europe's situation regarding geothermal resources and more specifically the position of Portugal towards this topic, being either its current installations or possible improvements.

In order to accomplish new results and develop the nowadays knowledge relevant to geothermal applications it is studied the performance of a ground source heat pump system (GSHP) applied to a monozone. The system consists of the monozone, the temperature control system, a water-water geothermal heat pump and the terrestrial heat exchanger. The application of a geothermal heat pump water water system in order to perform air conditioning through HVAC presents a greater need of components, namely not only the geothermal heat pump but also water-to-air heat exchangers which reduces the efficiency of the system as a whole. The simulation control is a preponderant factor in the interpretation of data resulting from the simulation in *TRNSYS*. The imposed values of conditioning were satisfactorily guaranteed, namely the comfort temperature values. The maximum temperature recorded in the model monozone was 25.67 °C in October and the minimum temperature was 19.64 °C in January. The geothermal heat pump presented an annual COP of 5.87 and EER (dimensionless) of 8.35. The thermal power output was satisfactory to meet the needs. The terrestrial heat exchanger used was a closed and series vertical heat exchanger. The selected drilling depth was 78 m and designated two drill holes. The soil temperature remained relatively stable.

KEYWORDS: Renewable energy; GSHP; Geothermal Heat Pump; Water-water heat pump; Borehole Heat Exchanger; TRNSYS

Agradecimentos

A execução de um trabalho de investigação como aquele presente neste documento, para além de vontade, crença e resiliência de quem o realiza, requer também o apoio e contributo de outras pessoas sem as quais não seria possível concretizar esta dissertação e às quais expresso a minha gratidão:

À professora Ana Isabel Palmero Marrero pela disponibilidade prestada para a realização da presente dissertação e compreensão pelos obstáculos que advieram do tema presente. As suas sugestões e apoio constituíram uma importante ajuda na tomada de decisão acerca das opções que se apresentaram no decurso da investigação.

Ao departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela disponibilidade de recursos por forma a elaborar este estudo que de outra forma seria impossível.

A todas as fortes amizades, quer na Faculdade, na Companhia Instável do Teatro do Campo Alegre como na cidade onde cresci, Espinho, por tanto me apoiarem com imensa vontade e desejo que esta dissertação fosse concluída com sucesso e que inúmeras vezes deram a motivação necessária para avançar com os trabalhos e ultrapassar qualquer tipo de obstáculo que surgiu.

A toda a minha família, em especial aos meus pais por tornarem possível toda a evolução e o culminar de uma fase de vida sem os quais não seria de todo possível ainda que todas as outras condições pudessem estar reunidas. A eles dedico em especial atenção todo o esforço e dedicação presentes nesta dissertação.

Álvaro Pereira

“I have not failed, but found 1000 ways to not make a light bulb.”

Thomas Edison

Lista de Figuras

2.1	Consumo energético final no setor residencial segundo tipo de aplicação e principais fontes energéticas [4]	5
2.2	Utilizações da energia geotérmica de acordo com o diagrama de Lindal [1]	7
2.3	Sumário simplificado das várias formas de energia geotérmica [9]	8
2.4	Visão esquemática de um sistema de GSHP [9]	9
2.5	Visão esquemática de um sistema de EGS [9]	10
2.6	Principais componentes de um sistema geotérmico residencial [17]	13
2.7	Esquema simplificado de uma bomba de calor [1]	15
2.8	Funcionamento de bomba de calor reversível, adaptado de [10]	16
2.9	Modelo conceptual de uma bomba de calor (esquerda) e um ciclo idealizado representado segundo pressão e entalpia (direita), adaptado de [20].	17
2.10	Comparação de temperaturas entre uma bomba de calor convencional (esquerda) e uma bomba de calor geotérmica (direita) [21].	18
2.11	Exemplo da variação da temperatura do solo de acordo com a profundidade em Ottawa, Canada [16].	19
2.12	Representação esquemática de sistemas geotérmicos superficiais abertos (A), fechados verticais (B) e fechados horizontais (C) [1].	20
2.13	Tipo de configuração de trajetórias de fluxo em permutadores de calor terrestres [25]	21
2.14	Ilustração de um permutador de calor terrestre horizontal [26].	21
2.15	Formatos mais comuns de permutadores horizontais. E normalmente entre 1-2m e $C > 0.75$ dependendo das condições de formação de gelo [27]	22
2.16	Tipo de configuração tubular horizontal - em formato Slinky [27]	22
2.17	Ilustração de um permutador de calor terrestre vertical [26].	24
2.18	Permutador de calor terrestre aberto com poço de reinjeção e extração [16]	26
2.19	Número de instalações com bomba de calor geotérmica na América do Norte, Europa e China em 2014, adaptado de [27] e base científica em [39,40]	28
2.20	Número de instalações com bomba de calor geotérmica por milhão habitantes na América do Norte, Europa e China em 2014, adaptado de [27] e base científica em [39,40]	29
2.21	Mapa de instalações com bomba de calor geotérmica e ar na Europa em 2015 [41]	29
2.22	Distribuição do numero de ocorrências geotérmicas de baixa entalpia em função da temperatura, em Portugal Continental [1]	30
2.23	Distribuição no mapa nacional das ocorrências geotérmicas em Portugal Continental [1]	31
2.24	Distribuição das ocorrências termais com temperatura $> 20^{\circ}\text{C}$ [43]	32
2.25	Projetos e fontes de informação utilizados no Atlas Geotérmico Nacional	33
2.26	Exemplos de mapas presentes no Atlas Geotermico [48]	35

2.27	Enquadramento tecno-estratigráfico das ocorrências geotérmicas e principais estruturas ativas em Portugal Continental [1]	36
2.28	Aplicações nas ocorrências geotérmicas em Portugal Continental [1]	37
2.29	Carta geológica das ocorrências geotérmicas em Portugal Continental, retirado de [1], legenda das ocorrências presenta na figura 2.27.	38
2.30	Esquema de promoção do aproveitamento dos recursos geotérmicos, retirado de [1]	39
3.1	Comparação qualitativa entre programas de simulação relativamente à modelação de sistemas AVAC, retirado de [54] com base científica em [53]	46
3.2	Tipo de configuração tubular vertical [58]	48
3.3	Esquema geral em <i>TRNSYS</i> de funcionamento do sistema	49
3.4	Esquema geral em <i>TRNSYS</i> do sistema de controlo	50
3.5	Edifício Base (<i>Case 600</i>) - Vista isométrica do canto com janela na parede Sul sudeste [55].	53
3.6	Interface de configuração da monozona	54
3.7	Formatos genéricos de tubulação em U [27].	70
4.1	Temperatura da monozona ao longo de um ano sem climatização	73
4.2	Temperatura da monozona ao longo de um ano com controlo <i>TRNBuild</i>	73
4.3	Temperatura ambiente e da monozona, sem controlo de temperatura, no dia de temperatura máxima	75
4.4	Temperatura ambiente e da monozona, sem controlo de temperatura, no dia de temperatura mínima	75
4.5	Potência térmica de aquecimento ao longo de um ano com <i>TRNBuild</i>	76
4.6	Potência térmica de arrefecimento ao longo de um ano com <i>TRNBuild</i>	77
4.7	Energia térmica mensal aplicada no edifício de acordo com <i>TRNBuild</i>	78
4.8	Potência registada no dia de potência de pico em aquecimento com <i>TRNBuild</i>	79
4.9	Potência registada no dia de potência de pico em arrefecimento com <i>TRNBuild</i>	80
4.10	Temperatura registada no dia de potência de pico em arrefecimento com <i>TRNBuild</i>	81
4.11	Potência térmica registada no dia com temperatura máxima com <i>TRNBuild</i>	81
4.12	Temperatura da monozona com climatização modelo	83
4.13	Variação da temperatura da monozona no mês de Janeiro de acordo com a tolerância de convergência	84
4.14	Variação da temperatura da monozona no mês de Outubro de acordo com a tolerância de convergência	85
4.15	Temperatura registada na monozona no dia de potência de pico em arrefecimento com climatização modelo	86
4.16	Temperatura registada na monozona no dia de potência em aquecimento mais elevada e temperatura mais baixa com climatização modelo	87
4.17	Temperatura registada na monozona no dia de temperatura mais elevada com climatização modelo	88
4.18	Temperatura registada na entrada de ar na monozona no dia de temperatura mais baixa	89
4.19	Temperatura registada na entrada de ar na monozona no dia de potência de pico de arrefecimento mais elevada	89
4.20	Fluxo mássico registado na entrada de ar na monozona no dia de temperatura mais baixa	90
4.21	Fluxo mássico registado na entrada de ar na monozona no dia de potência de pico de arrefecimento mais elevada	91

4.22	Potência térmica à saída da bomba de calor geotérmica ao longo de um ano; (+) aquecimento (-) arrefecimento	92
4.23	Potência elétrica consumida pela bomba de calor geotérmica ao longo de um ano; (+) aquecimento (-) arrefecimento	93
4.24	COP/EER da bomba de calor geotérmica ao longo de um ano; (+) aquecimento (-) arrefecimento	94
4.25	COP/EER médio mensal da bomba de calor geotérmica	95
4.26	Energia elétrica mensal consumida pela bomba de calor geotérmica	96
4.27	Temperatura do solo e à saída do permutador de calor terrestre ao longo de um ano	97

Lista de Tabelas

2.1	Vantagens e desvantagens da configuração em série e paralelo	20
2.2	Exemplo de bombas de calor geotérmicas e respectivos parâmetros técnicos (Temperatura entrada do fluido na fonte: 30 °C Arrefecimento/10°C Aquecimento), retirado de [28]	24
2.3	Bombas de calor geotérmicas registadas a 31 de dezembro de 2014 [49].	39
2.4	Listagem de instalações geotérmicas de uso direto registadas a 31 de dezembro de 2014 [49].	40
3.1	Resumo de programas apropriados à simulação de sistemas/componentes AVAC e sistemas de energias renováveis [53]	45
3.2	Parâmetros de definição dos termostatos <i>TYPE108</i> e <i>TYPE108-2</i> em <i>TRNSYS</i>	51
3.3	Características gerais dos elementos de construção da monozona	53
3.4	Principais características da janela alternativa ao modelo base	54
3.5	Exemplo de variação de resultados para o modelo TRANE WPWD 024 entre o <i>TYPE927</i> e valores de catálogo	56
3.6	Dados principais do modelo <i>5 series NSW018</i>	57
3.7	Valores de base utilizados na introdução de dados no <i>TYPE 927</i>	58
3.8	Dados utilizados na parametrização do <i>TYPE 927</i>	58
3.9	Número de Reynolds em pré-dimensionamento	60
3.10	Fator de carga para cada modo de funcionamento	64
3.11	Valores de pré-dimensionamento do comprimento do permutador de calor terrestre	65
3.12	Comprimento final do permutador de calor terrestre de acordo com o modo de funcionamento da bomba	66
3.13	Valores inseridos no <i>TYPE 557a</i>	67
3.14	Resultados da variação de valor da resistência térmica relativamente a um valor referência segundo várias propostas de equação de cálculo, retirado de [74].	69
3.15	Resistência térmica do permutador de calor terrestre de acordo com o espaçamento entre tubos	71
3.16	Valores finais de calculo da resistência térmica do permutador de calor terrestre	71
4.1	Intervalo horário correspondente ao mês do ano com simulação anual	74
4.2	Potências de pico registadas na monozona ao longo de um ano com <i>TRNBuild</i>	77
4.3	Energia térmica mensal aplicada aplicada no edifício de acordo com <i>TRNBuild</i>	78
4.4	Dados de controlo da simulação	82
4.5	Valores de potência térmica indicados em catálogo para o intervalo de condições de funcionamento da simulação, em aquecimento.	93
4.6	Valores de COP indicados em catálogo para o intervalo de condições de funcionamento da simulação, em aquecimento.	95

4.7	Tabela resumo de resultados anuais da bomba de calor geotérmica	98
4.8	Tabela resumo de resultados do permutador de calor terrestre	98
4.9	Tabela resumo de resultados para a monozona modelo	99
4.10	Comprimento do permutador de calor terrestre considerando um redimensionamento	100
4.11	Dados comparativos entre uma bomba de calor convencional e uma bomba de calor geotérmica	100
4.12	Previsão de variação de custo a 5 anos [€]	101
C1	<i>Bin hour</i> para a cidade do Porto - janeiro e agosto	120
C2	Horas de funcionamento em arrefecimento para Agosto	121
C3	Horas de funcionamento em aquecimento para Janeiro	121
C4	Condutividade térmica de argamassas [74].	122
C5	Condutividade térmica e capacidade térmica de diferentes tipos de rocha [78]. . .	123

Siglas

AQS Águas Quentes Sanitárias

ASHRAE *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

AVAC Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

COP *Coefficient of Performance*

EER *Energy Efficiency Rating*

EGS *Enhanced Geothermal System*

GHE *Ground Heat Exchangers*

GHP *Geothermal Heat Pump*

GS Geotermia Superficial

GSHP *Ground Source Heat Pump*

HDR *Hot Dry Rock*

HSA *Hot Sedimentary Aquifer*

LNEG Laboratório Nacional de Energia e Geologia

SDR *Standard Dimension Ratio*

TRT Testes de Resposta Térmica

WSHP *Water Source Heat Pump*

WWHP *Water-Water Heat Pump*

Símbolos

α_{abs} Absortancia

C_p Calor específico fluido [$J/kg \cdot K$]

L Comprimento total do permutador de calor [m]

k_g Condutividade térmica da argamassa [$W/m \cdot K$]

k_s Condutividade térmica do solo [$W/m \cdot K$]

k_p Condutividade térmica do material do tubo [$W/m \cdot K$]

D_0 Diâmetro exterior do tubo [m]

D_1 Diâmetro interior do tubo [m]

d_n Diâmetro nominal do tubo [m]

d_b Diâmetro da perfuração [m]

α Difusividade térmica do solo [m^2/dia]

s Distancia entre perfuração [m]

e Espessura [m]

F Fator de utilização

g Fator Solar

\dot{V} Fluxo volumétrico [l/h]

FF_{fixa,T_m} Fração de funcionamento da bomba de calor geotérmica

h Indicação de aquecimento

c Indicação de arrefecimento

A_s Oscilação máxima anual da temperatura à superfície [$^{\circ}C$]

t_0 Numero de dias de desfasamento

N_p Número de potências registadas

N_b Número de perfurações no solo

P_{fixa,T_m} Potência necessária no edifício, determinada para T_m [kW]

P_e Potência elétrica [kW]

P Potência térmica [kW]

X_s Profundidade definida para temperatura máxima e mínima do solo [m]

z_b Profundidade de perfuração [m]

R_{fsol} Reflectância solar na face exterior

R_s Resistência térmica do permutador de calor terrestre [$K \cdot m/W$]

R_p Resistência térmica da tubulação [$K \cdot m/W$]

Re Número de Reynolds

T_m Temperatura média [$^{\circ}C$]

T_h Temperatura máxima de entrada da bomba [$^{\circ}C$]

T_s Temperatura máxima de saída da bomba [$^{\circ}C$]

T_H Temperatura máxima do solo [$^{\circ}C$]

$T_{m,s}$ Temperatura média do solo [$^{\circ}C$]

T_L Temperatura mínima do solo [$^{\circ}C$]

T Temperatura [$^{\circ}C$]

T_{sol} Transmitância solar

U Transmissão térmica [W/m^2K]

T_{vis} Transmitância visível

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	Estado de Arte	4
2.1	Energia Geotermica - Definição e Conceitos Base	4
2.2	Modos de Exploração	8
2.2.1	Produção de eletricidade e Uso Direto	10
2.3	Geotermia Superficial	12
2.3.1	Bomba de Calor Geotérmica	14
2.4	Permutadores de Calor Terrestres	18
2.4.1	Sistemas de circuito fechado	20
2.4.2	Sistemas de circuito aberto	25
2.5	Geotermia Superficial na Europa	27
2.6	Geotermia em Portugal Continental	30
2.6.1	Atlas Geotérmico Nacional	32
2.6.2	Localização e modos de ocorrência	34
2.7	Aplicação Prática	39
2.7.1	Avaliação de recursos, instalação e legislação aplicável	40
2.8	Sustentabilidade e Concepções Sociais	42
2.9	Enquadramento de mercado	42
3	Metodologia e modelo	44
3.1	Metodologia do trabalho	44
3.2	Descrição de software - <i>TRNSYS</i> e Modelo Construtivo Base	45
3.3	Modelação e esquematização em <i>TRNSYS</i>	48
3.4	Monozona modelo	52
3.5	Modelação da bomba de calor geotérmica	55
3.6	Permutador de Calor Terrestre	59
3.6.1	Resistência Térmica do Permutador	67
4	Análise de resultados	72
4.1	Análise de resultados sem aplicação da bomba de calor geotérmica	72
4.2	Análise de resultados com aplicação da bomba de calor geotérmica	82
4.2.1	Resultados referentes a temperaturas	82
4.2.2	Resultados referentes a potência térmica e elétrica	91
4.2.3	Resultados referentes à temperatura do solo	96

4.3	Resumo final de resultados	97
5	Conclusões e Trabalho Futuro	102
5.1	Satisfação dos Objetivos	102
5.2	Trabalho Futuro	103
	Referências	104
	Anexos	
A	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS - CASE 600	109
B	ESPECIFICAÇÕES DE CATÁLOGO DA BOMBA DE CALOR	114
C	TABELAS APLICADAS NO PERMUTADOR DE CALOR TERRESTRE	119
C.1	FATOR DE CARGA AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO	120
C.2	CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ARGAMASSAS	122
C.3	CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE ROCHAS	123

Capítulo 1

Introdução

Este primeiro capítulo tem como objetivo contextualizar e apresentar a dissertação que foi desenvolvida e que será relatada neste documento. Inclui três secções, designadamente: o enquadramento, os objetivos delineados para a elaboração e desenvolvimento do projeto e, por último, a estrutura do projeto.

No enquadramento da dissertação 1.1, faz-se a identificação e a apresentação inicial da problemática em estudo, de acordo com a investigação relevante. De seguida, procede-se à definição do objetivo geral da dissertação e dos objetivos específicos que orientaram esta dissertação 1.2. Termina-se o primeiro capítulo com a apresentação do plano geral da dissertação onde se descreve a estrutura geral desta 1.3 e se apresenta, resumidamente, o assunto tratado em cada um dos capítulos que a constituem.

1.1 Enquadramento

A energia geotérmica é a energia obtida a partir do calor proveniente do interior da Terra, pelo que a geotermia é considerada fonte renovável. Ainda que em Portugal continental as temperaturas disponíveis de geotermia não sejam suficientemente elevadas para a geração de energia elétrica, há outro potencial que se pode aproveitar: a instalação de bombas de calor geotérmicas, que podem ser usadas para climatização e produção de águas quentes sanitárias. Tendo em conta a crescente necessidade de encontrar formas alternativas por forma a dar resposta às elevadas necessidades energéticas e ao seu impacto nos ecossistemas, a energia geotérmica surge como uma resposta possível. Servirá então esta dissertação não apenas como uma base de pesquisa científica mas também como mais uma acção de sensibilização perante um problema cuja resolução se tem vindo a adiar, cujas respostas não têm vindo a ser tão céleres e eficazes quanto necessárias.

1.2 Objetivos

Nesta dissertação irão ser analisados os diferentes locais geotérmicos que existem em Portugal continental. Para isso irão ser estudados os diferentes enquadramentos da energia geotérmica e o

seu encaixe no território nacional, ou seja, quais os modos de exploração aplicáveis em Portugal Continental. A geotermia superficial será avaliada em maior detalhe. Como ferramenta serão observados os mapas geotérmicos criados através da Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial. A seguir, serão estudadas as bombas de calor que poderão ser utilizadas nas diferentes regiões de Portugal, utilizando como fonte a energia geotérmica. Bem como também serão analisadas as tipologias de permutador de calor terrestre e qual a melhor forma para realizar o seu dimensionamento. Por último, irá ser aplicada uma bomba de calor geotérmica para climatização de uma monozona modelo num local escolhido, e será calculado o desempenho energético da mesma.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos.

O primeiro capítulo está dividido em três secções: enquadramento, objetivos e estrutura da dissertação. Este capítulo tem como objetivo apresentar e contextualizar o trabalho desenvolvido.

No segundo capítulo é realizada uma revisão do estado de arte, ou seja, serão levantadas as informações relevantes para o tema da dissertação e que poderão elevar o conhecimento sobre o tema e dar início aos trabalhos desenvolvidos através de uma sólida base de conhecimentos primários. Este capítulo encontra-se subdividido em nove secções com aprofundamentos variáveis de acordo com a sua relevância. Aqui serão encontradas informações quanto à definição e conceito base da energia geotérmica, os seus modos de exploração, definição de geotermia superficial e de uma bomba de calor geotérmica, tipos de permutadores de calor terrestres, enquadramento da geotermia superficial na Europa e em Portugal Continental. Uma vez que também é importante ter presente a praticabilidade dos projetos e o enquadramento nacional na aplicação destes conceitos foram levantadas também informações quanto a exemplos reais de instalações, quais os métodos para uma aplicação prática, a sustentabilidade e concepções sociais dos projetos bem como um breve enquadramento de mercado.

O terceiro capítulo está subdividido em seis secções onde é apresentada, no seu conjunto, a metodologia e modelo utilizados. Este capítulo irá então comportar, de acordo com cada subdivisão, os seguintes assuntos: a metodologia do trabalho, a descrição de software, a esquematização aplicada no software, o modelo da monozona utilizada, a modelação da bomba de calor geotérmica e o dimensionamento do permutador de calor terrestre. Em cada subdivisão poderão ser encontradas as características quantitativas e qualitativas inerentes a cada passo realizado por forma a efetuar posteriormente uma melhor análise de resultados.

No quarto capítulo, apresenta-se a análise de resultados da modelação e simulação da monozona em estudo, avaliando devidamente os valores obtidos por forma a verificar se estes serão expectáveis ou não. Os valores resultantes são analisados de acordo com a sua relevância no tempo de simulação e o seu enquadramento na estruturação realizada de simulação. Neste capítulo irão ser apresentados os resultados com a inclusão da bomba de calor geotérmica e o comportamento da monozona isoladamente.

O quinto capítulo encontra-se sub dividido em duas secções: conclusões e trabalhos futuros. Neste capítulo descrevem-se as considerações finais do projeto relativamente aos resultados obtidos bem como as dificuldades apresentadas. Uma vez estabelecidas as conclusões inerentes ao fim do processo de investigação, são apresentadas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros que tomarão partido do trabalho desenvolvido aqui presente.

Capítulo 2

Estado de Arte

2.1 Energia Geotermica - Definição e Conceitos Base

Na entrada do século XXI, a sociedade vê-se deparada com a obrigatoriedade irreversível de responder questões de sustentabilidade, eficiência energética e a repensar a sua relação com o meio envolvente a várias dimensões. Desta forma vê-se então obrigada, por inúmeras razões, a seguir modelos de desenvolvimento condicionados por três ideias estruturais:

- Necessidade de regulamentação e imposição de eficiência energética e aproveitamento de recursos endógenos renováveis devido à escassez de energia passível de aproveitamento e à utilização de recursos energéticos finitos
- A redução de emissão de resíduos tóxicos tanto para atmosfera como para os solos ou qualquer outro resultado de atividade que possa ter impacto negativo no nosso ecossistema global
- Elevado crescimento demográfico com especial relevo para as grandes metrópoles que com o aumento do padrão base de qualidade de vida leva a um aumento constante da procura de alimentos, água e energia [1].

Mais de um terço do consumo energético global devem-se aos edifícios residenciais e de serviços [2] sendo consequentemente também responsáveis por cerca de um terço das emissões de gases com efeito de estufa [3]. As necessidades energéticas principais nos edifícios residenciais centram-se na climatização dos mesmos, sendo então prioritário a alocação de esforços na redução deste consumo e na fonte energética de mitigação das necessidades de aquecimento e arrefecimento [4].

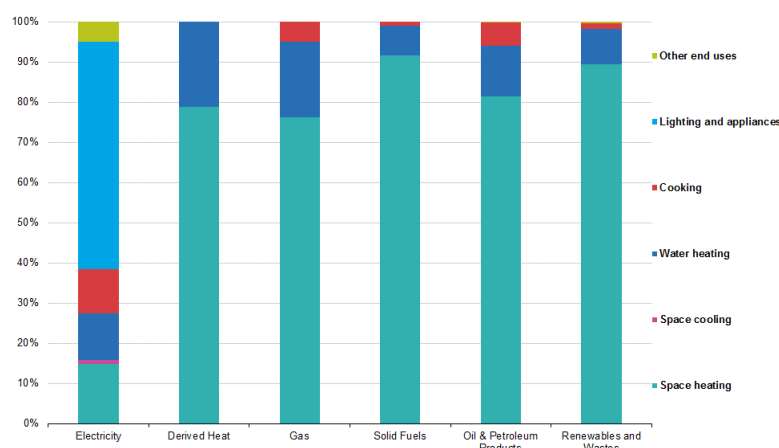


Figura 2.1: Consumo energético final no setor residencial segundo tipo de aplicação e principais fontes energéticas [4]

De acordo com o Artigo 3.º presente no Acórdão do Tribunal Constitucional publicado em diário de Republica em Maio de 2014, recurso geotérmico está definido como sendo "os fluidos e as formações geológicas do subsolo, de temperatura elevada, cuja entalpia seja suscetível de aproveitamento" [5]. No entanto também é possível encontrar na esfera científica uma aproximação ao tema, sendo geotermia entendida de um modo geral como o conjunto de ciências e técnicas que estudam e exploram o calor terrestre. Este conjunto vai desde as ciências geológicas (através do recurso à geologia estrutural ou vulcanologia), passando pela geofísica e geoquímica(sismologia e tecnologia de sondagem), ou à engenharia mecânica e de minas (desde as turbinas de vapor e equipamentos periféricos de separação até aos permutadores e bombas de calor) [6].

A energia geotérmica apresenta características que permitem defini-la como sendo renovável, inesgotável, ecológica (devido à reduzida emissão de gases), segura, disponível 24h por dia, independente do custo do combustível. A sua versatilidade também é digna de destaque uma vez que permite a produção de energia, aquecimento ou arrefecimento urbano, armazenamento de energia e a sua aplicação em conjunto com outras fontes de energia. [7] Desta forma observa-se aqui uma possível alternativa às fontes energéticas tradicionais e um motor de desenvolvimento local.

A sua origem provem do interior da Terra e apresenta em termos médios uma aumento de temperatura em profundidade de aproximadamente 33°C por km. Uma vez que a crosta terrestre se apresenta heterogénea, é possível verificar zonas anómalas que providenciam maior ou menor gradiente de variação. Por forma a haver aproveitamento da energia geotérmica é necessário que existam gradientes térmicos relevantes. Prioritariamente são alvo de maior atenção zonas afetadas por fenómenos vulcânicos não sendo obstante a possível atenção dada a outras zonas que, atendendo a outros eventos geológicos, providenciem condições de aproveitamento. Um reservatório será tanto mais acessível quanto maior a sua temperatura e menor a profundidade a que se encontra.

Os sistemas geotérmicos apresentam variações locais de temperatura, permeabilidade, porosidade, geometrias e profundidades das anomalias. O aproveitamento de energia geotérmica implica

a existência de fluido que transporte calor do interior das estruturas geológicas até à superfície. Atualmente é possível realizar uma exploração convencional através de reservatórios que apresentem fluido natural e permeabilidade necessária para proceder às várias formas de exploração. Ou então realizar geotermia estimulada cuja única finalidade, atualmente, se prende à produção de energia elétrica onde atendendo à falta de condições naturais se procede artificialmente à injeção de fluido no sistema geológico. Um reservatório geológico encontram-se em condições de estudo geotérmico caso exista:

1. Uma fonte de calor;
2. Cobertura rochosa que provoque a preservação de calor no interior do mesmo;
3. Permeabilidade no cerne do reservatório para que circule um fluido capaz de transportar a energia sob a forma de calor para a superfície em condições rentáveis.

Em função da temperatura a que se encontra o fluido de transporte de calor, os reservatórios são classificados da forma que se segue:

- Alta entalpia - com temperatura superior a 150°C, encontrados principalmente em zonas de elevado gradiente geotérmico e a profundidade variável - entre 1500m a 3000m. São constituídos por vapor seco ou mistura de água e vapor e aproveitado maioritariamente para a produção de energia elétrica;
- Média entalpia - com temperatura entre os 150°C e 100°C, encontrados principalmente em zonas de elevado gradiente geotérmico e a profundidades inferiores a 2000m, e em bacias sedimentares com profundidade entre os 3000m e 4000m.
- Baixa entalpia - com temperatura entre os 100°C e 30°C, encontrados habitualmente em zonas com gradiente geotérmico médio e a profundidades entre os 1500m e 2500m, sendo no entanto possíveis de encontrar a profundidades de 1000m caso seja uma zona de gradiente geotérmico elevado.

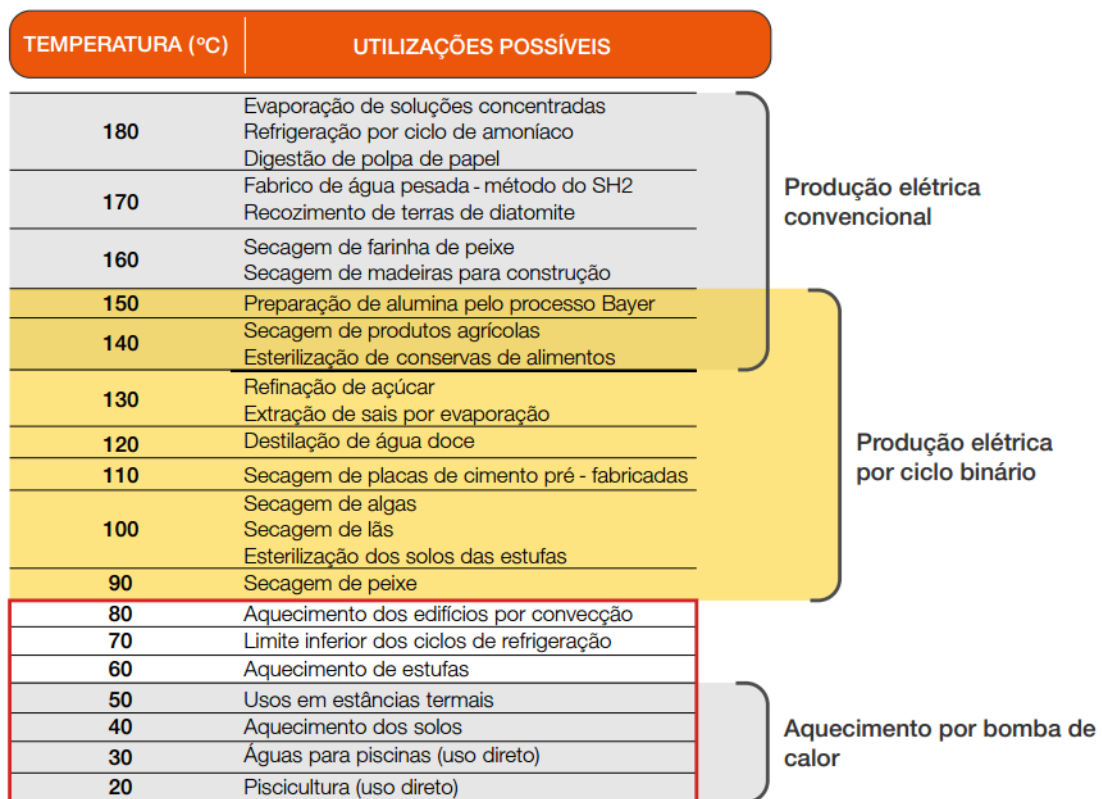


Figura 2.2: Utilizações da energia geotérmica de acordo com o diagrama de Lindal [1]

Abaixo dos 30°C é considerada Muito Baixa entalpia e suscetível de aproveitamento através de bombas de calor, não sendo considerado reservatório uma vez que é comum em toda a crosta terrestre. Normalmente a energia é aproveitada através de águas subterrâneas, incluindo as provenientes de atividades mineiras e drenagem de obras públicas, sendo estas últimas apenas utilizadas exclusivamente pelo seu potencial energético. As profundidades de trabalho realizam-se normalmente a menos de 200m. No caso de instalações em edifícios, os aproveitamentos realizam-se a partir de 1 a 2m, sendo a temperatura do solo estabilizada ao longo do ano a partir dos 8-10m. [8].

O diagrama de Lindal (ver figura 2.2) tem vindo a servir de base para a comunidade científica por forma a enquadrar as possíveis aplicações segundo a temperatura disponível. No entanto a evolução tecnológica nas várias fases de desenvolvimento e aplicação, tal como a prospeção e pesquisa, perfuração ou tecnologias de transformação do recurso energético, têm levado a algumas alterações no diagrama possibilitando em alguns casos aproveitamentos a temperaturas inferiores às indicadas no diagrama para a utilização indicada [1]. A figura 2.3 apresenta um sumário simplificado das várias formas de energia geotérmica.

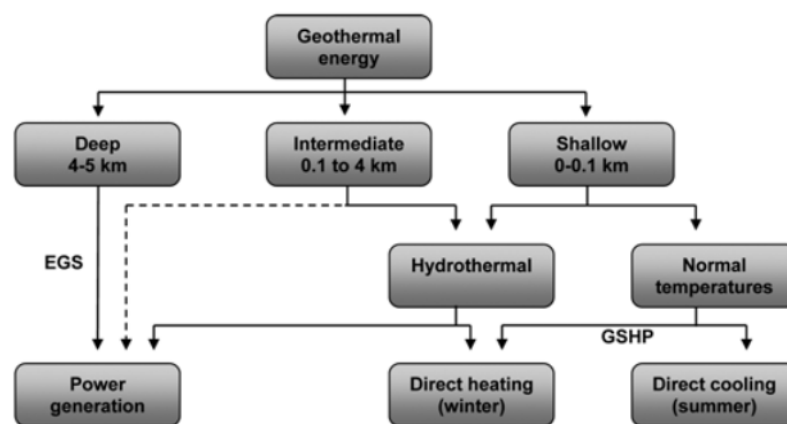


Figura 2.3: Sumário simplificado das várias formas de energia geotérmica [9]

2.2 Modos de Exploração

O ser humano utiliza a energia geotérmica desde os tempos pré históricos através das fontes termais com aplicações de aquecimento, banhos e aplicações terapêuticas. No entanto, foi na localidade francesa de Chaudes-Aigues no século XIV que foi introduzido o primeiro conceito tecnológico de aproveitamento, district heating. Existem muitos outros exemplos de aplicações espalhadas pelo mundo onde água quente obtida em profundidades até 1 quilometro é canalizada para uso doméstico, comercial e industrial. Entretanto em 1904, através de vapor proveniente de geysers em Itália, foi dada a esta fonte energética a possibilidade de geração de eletricidade e posteriormente em 1958 na Nova Zelândia se procedeu à comercialização deste tipo de aplicação. Após a primeira crise do petróleo em 1973, deu-se um grande desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento da energia geotérmica à escala mundial e conceptualizados novos modelos de exploração.

Paralelamente também foram desenvolvido sistemas de extração de calor do solo nomeadamente através de bombas de calor. Este sistema foi desenvolvido por Lord Kelvin em 1852 mas apenas nas duas ultimas décadas tem-se assistido a um aumento da utilização deste sistema aplicado ao potencial do solo, geralmente associado ao conceito de *Ground Source Heat Pump (GSHP)* para aquecimento e arrefecimento de edifícios ou em casos de maior dimensão zonas residenciais ou serviços de aquecimento urbano em rede. Sistemas como estes estão a se desenvolver rapidamente, particularmente em algumas zonas da Europa, América do Norte e China. A figura 2.4 apresenta um esquema simplificado, sendo de notar que não se encontra à escala real e os furos no interior do solo estão em escala reduzida comparativamente ao edificio.

A industria geotérmica aliada aos conhecimentos científicos das áreas alicerces, pode ser revelada nas seguintes vertentes:

- (a) Geotermismo clássico (ou tradicional) onde se incorpora a produção de eletricidade e o aquecimento urbano;

- (b) Geotermismo novo (ou superficial) onde é incorporado o potencial térmico do solo e subsolo a pequenas profundidades ou em aquíferos superficiais realizando armazenamento energético para aproveitamento diferenciado consoante objetivo de retirar ou fornecer calor;
- (c) Geotermismo futuro (ou simulado) onde é incorporado o potencial energético de áreas onde as condições de permeabilidade e existência de fluido são artificialmente criadas e/ou a profundidade a trabalhar é bastante elevada [1].

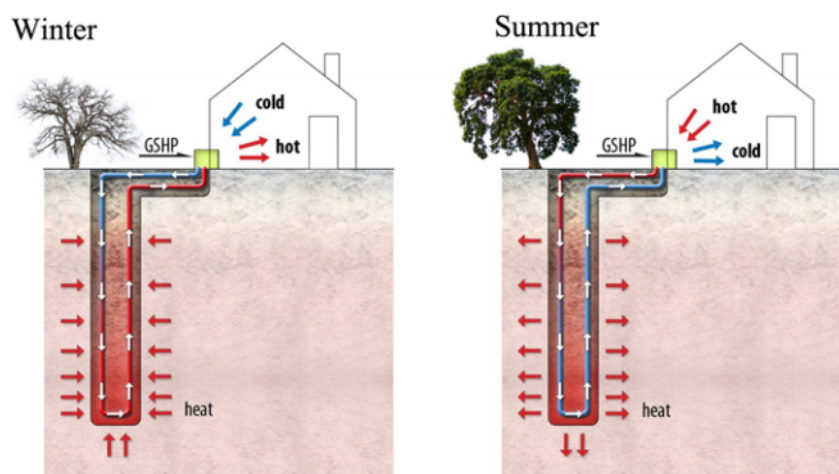


Figura 2.4: Visão esquemática de um sistema de GSHP [9]

Devido à variação de profundidade também é normal realizar a distinção da energia geotérmica segundo:

- Geotermia de profundidade - geralmente definida como energia extraída a partir dos 500m de profundidade em diante;
- Geotermia Superficial - geralmente definida como energia obtida até os 400m de profundidade.

Os recursos geotérmicos debatidos até ao momento estão relacionados com geotermia de baixa profundidade, quer sejam os aproveitamentos de águas termais ou vapor, ou os aproveitamentos de temperaturas de solo mais baixas através de *GSHP*. No entanto, nos últimos anos têm sido reunidos esforços para aproveitamentos de profundidades consideráveis (normalmente entre 4km a 5km). Este sistema compreende a perfuração de um poço profundo de injeção e outro de produção na mesma formação rochosa. A água é forçada para o interior através do poço de injeção, circula no sistema rochoso a altas temperaturas para receber energia térmica e retorna à superfície através do poço de produção. A água quente obtida será então aproveitada para produzir vapor ou outro gás mais volátil que acione o sistema de transformação de energia térmica para energia elétrica.

Caso exista um aquífero profundo, a fonte é normalmente designada por *Hot Sedimentary Aquifer (HSA)* onde a formação rochosa é relativamente impermeável. Caso seja necessária intervenção na estrutura rochosa por forma a dispor adequada permeabilidade, estes sistemas são geralmente referenciados como *Enhanced Geothermal System (EGS)* ou *Hot Dry Rock (HDR)* [9].

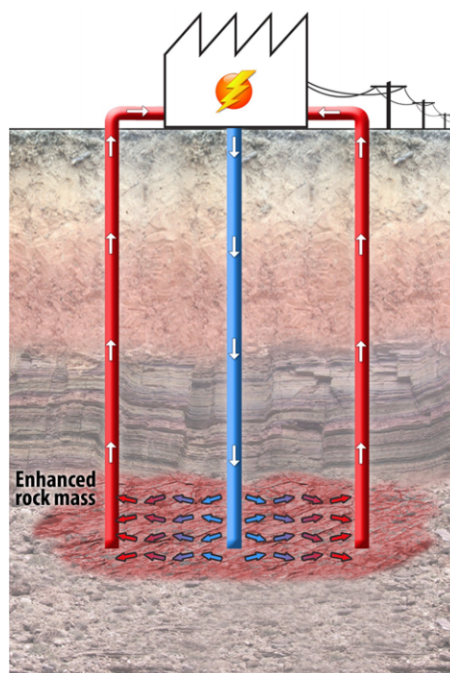


Figura 2.5: Visão esquemática de um sistema de EGS [9]

2.2.1 Produção de eletricidade e Uso Direto

A produção de eletricidade é uma transformação passível de aplicação seguindo o potencial de uma fonte geotérmica proveniente de um jazido mineral a alta temperatura através do trabalho incidente na produção de vapor a alta pressão, à semelhança de sistemas tradicionais tais como a queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) ou energia nuclear. Todos estes sistemas já largamente convencionados revelam elevado rendimento sendo passível então uma adaptação eficaz e partilha de conhecimento com a área de geotermia na área de transformação energética [10].

A maioria das tecnologias desenvolvidas até ao momento encontram-se orientadas para a exploração de sistemas geotérmicos convencionais. O processo de seleção do sistema mais eficaz depende das propriedades geológicas do local (fluido e reservatório) que serão exploradas tais como a geologia, química e propriedades físicas e termodinâmicas [11].

Os recursos geotérmicos apropriados para a geração de eletricidade podem ser categorizados em três grupos:

- (a) sistemas de vapor com temperaturas superiores a 240 °C;

- (b) água com temperaturas até 350 °C;
- (c) sistema petrotérmico ou rocha seca a altas temperaturas (*EGS*,*HDR*) com temperaturas superiores a 650 °C [12].

Os itens (a) e (b) relacionam-se com os sistemas convectivos que são normalmente explorados comercialmente enquanto que o item (c) refere-se à exploração de *EGS* ou *HDR*. Três tipos de tecnologias encontram-se neste momento devidamente maturadas e aplicadas no mercado para exploração nomeadamente vapor seco, flash (individual, duplo e triplo) e ciclo binário [13].

Os últimos empreendimentos na área de produção elétrica revelam um fator de capacidade de aproximadamente 90%. Desde a primeira estação de *EGS* em Fenton Hill, Reino Unido, esta tecnologia obteve um ganho de 40 anos de experiência desenvolvida e desde então pelo menos 18 instalações estão em operação [14]. De acordo com [14] existe a previsão de, com 85% de probabilidade, ser instalada uma capacidade de 70GWe até 2050. No entanto, o crescimento ao ano da produção de eletricidade através de energia geotérmica tem sido bastante reduzido. O seu crescimento tem sido linear contrastando com o crescimento acelerado que se tem vindo a verificar no aproveitamento eólico e fotovoltaico. Segundo [15] constata-se que o investimento inicial avultado, longo período de retorno de investimento, longo período para construção das instalações, dificuldade de acesso ao recurso e dificuldade de modelação de sistemas fazem com que sejam selecionadas outras fontes energéticas renováveis em preterimento da fonte geotérmica. No entanto é possível apontar possíveis soluções e direções por forma a acelerar o processo de crescimento tais como o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias tais como *TEG* (*Thermoelectric Generators*), co-produção de um sistema geotérmico e gás/petróleo e por fim *EGS*. Apesar de a produção de energia elétrica com fonte geotérmica apresentar bastantes barreiras para a sua instalação, também apresenta vantagens relativamente a outras fontes energéticas, renováveis ou convencionais, tais como a elevada eficiência térmica, grande estabilidade, imunidade às condições atmosféricas, cumprimento de cargas base em rede, menor ocupação de terreno e menor impacto ecológico [1].

Sob o nome de uso direto ou imediato, a energia geotérmica inclui diferentes formas para obter aquecimento, arrefecimento ou ar condicionado, e produzir água sanitária quente, o que exclui o uso da dita energia para produzir energia elétrica. Tradicionalmente, o uso do calor geotérmico em aplicações que não a geração de eletricidade foi realizado em pequena escala, em nível individual, mas os avanços experimentados nos últimos anos incluem projetos coletivos em grande escala, como aquecimento urbano e produção de AQS. na Islândia e na França, complexos de estufa na Hungria e na Rússia e grandes aplicações industriais na Nova Zelândia e nos Estados Unidos.

A indicação de uso direto refere-se à maneira de aceder à exploração do recurso no subsolo, através de sondas de perfuração e permutadores de calor, e alguns aspetos relevantes de aplicações de calor de baixa, média e até alta temperatura, que não incluem as premissas de produção de energia elétrica e a utilização de bombas de calor geotérmicas. Exceto nas fontes termais que fluem espontaneamente, a maioria das explorações geotérmicas precisa, em primeiro lugar, de uma sonda de produção que permita elevar a água quente e / ou o vapor até a superfície.

O conteúdo de sais dissolvidos, ou sólidos em suspensão, é a razão pela qual as águas geotérmicas não podem ser conduzidas diretamente aos pontos de utilização final. Alguns permutadores de calor são usados para permitir a transferência de calor para outros fluidos (água também, normalmente), que compõem o circuito secundário de entrega final de calor para o local final de aplicação. Neste tipo de instalações, o desempenho é altamente dependente da capacidade do permutador de calor, que deve ser capaz de transmitir o fluxo térmico do circuito primário ou geotérmico para o circuito secundário ou de distribuição, com as menores perdas possíveis de calor para o ambiente externo. Estas aplicações dependem precisamente do intervalo de temperaturas do circuito secundário, que serão as que permitem classificá-las, nomeadamente:

- Piscinas e instalações termais;
- Aquecimento de edifícios e Águas Quentes Sanitárias (AQS);
- Aquicultura e pecuária;
- Secagem de alimentos e madeira [10].

2.3 Geotermia Superficial

A energia geotérmica a baixa temperatura baseia as suas aplicações na capacidade que o subsolo tem em acumular calor e manter uma temperatura constante a determinada profundidade ao longo de todo o ano. A geotermia superficial em Portugal, como é referenciado em [1], está normalmente associado ao conceito de aplicação de bombas de calor geotérmicas. Na comunidade científica, o tema é normalmente abordado como *GSHP* no entanto pode ser referido de outras formas tais como *Geothermal heat pumps*, *earth energy systems*, *ground-coupled heat pumps* e *ground-source systems* [16].

Os sistemas geotérmicos superficiais são sistemas energéticos que a partir de bombas de calor aproveitam o solo como fonte de transferência energética, tanto para aquecimento como para arrefecimento. Estes sistemas estão disponíveis há vários anos mas apenas recentemente ressurgiram como objeto de estudo e desenvolvimento mais aprofundado dada a sua resposta a novos enquadramentos sociais, ambientais e energéticos. Esta nova aproximação deve-se às manifestas crises petrolíferas que consequentemente levaram a um aumento do custo deste combustível, à necessidade de utilizar a energia de forma mais racional e também devido às recentes e relevantes preocupações ambientais [1].

Estes sistemas são normalmente aplicados em climatização (aquecimento e/ou arrefecimento) e AQS em empreendimentos de dimensão reduzida como vivendas uni-familiares ou empreendimentos de maiores dimensões como complexos hospitalares, edifícios residenciais, comerciais ou serviços. De acordo com o tamanho da aplicação irá variar o espaço de transferência de calor com o solo. Em aplicações de pequena dimensão é normalmente utilizado o terreno circundante e em aplicações de maiores dimensões são realizados furos geotérmicos com permutadores de calor enterrados a maiores profundidades [1].

Os sistemas geotérmicos superficiais têm como ponto de vantagem a captação/libertação de calor ser efetuada no solo o que permite uma temperatura de troca de calor estável dada a estabilidade térmica ao longo do ano deste elemento, ao contrário de outras fontes exteriores como a água e o ar. As bombas de calor, através de um ciclo termodinâmico, permitem a transferência de calor de uma fonte para outra, contrariando a direção espontânea do fluxo de calor. Assim sendo estamos perante um equipamento reversível que pode ser então utilizado para climatização(aquecimento e arrefecimento) de ambientes interiores, produção de AQS ou aquecimento de piscinas [1]. Por forma a compor um sistema de geotermia superficial são então normalmente designados três sistemas principais:

- Ligação ao solo (1) - Facilita a transferência de energia térmica entre o solo e a bomba de calor
- Bomba de calor geotérmica (2) - Imposição de gradiente térmico entre o solo e o edifício;
- Sistema de distribuição do edifício (3) - Condiciona o ambiente dentro do edifício.

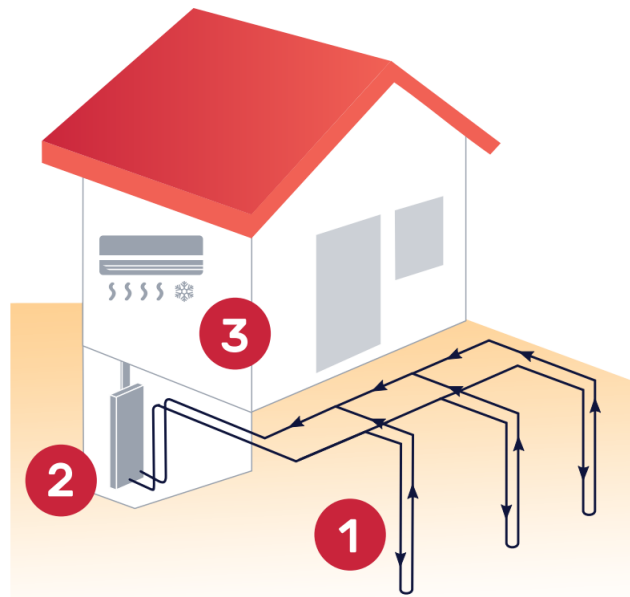


Figura 2.6: Principais componentes de um sistema geotérmico residencial [17]

As necessidades energéticas residenciais centram-se maioritariamente na gestão do conforto ambiente (ver figura 2.1 no capítulo 2.1) sendo então uma opção referenciada para climatização. No entanto, pese a elevada disponibilidade deste recurso, o seu rendimento pode ser variável estando dependente da temperatura a que se efetuam as trocas de calor. A temperatura do solo a que é realizada a transferência está dependente das seguintes variáveis:

$$T_{sp} = F(T_s, s, x, k, C_e, t)$$

onde,

- T_{sp} = Temperatura do solo a uma determinada profundidade;
- T_{ss} = Temperatura do solo à superfície;
- x = profundidade à superfície;
- k = condutividade térmica do solo;
- C_e = calor específico do solo;
- t = intervalo temporal de troca de calor

Será por demais evidente que o comportamento do solo no que diz respeito à sua capacidade de transferência e armazenamento de calor irá condicionar o desempenho de um sistema geotérmico.

No caso de transferência de calor por convecção, a permeabilidade do solo também será um fator importante e talvez decisivo. A título de exemplo observamos o cascalho onde, apesar de não apresentar elevada condutividade térmica, apresenta elevada permeabilidade o que na presença de água eleva o seu potencial térmico. No entanto a argila que apresenta melhor condutividade que o cascalho, em casos de saturação idênticos, irá apresentar menor potencial térmico uma vez que a sua baixa permeabilidade compromete o balanço global de condições ótimas [10].

No âmbito geral, as aplicações irão depender fundamentalmente da temperatura do solo e da sua capacidade de transmitir ou absorver calor relativamente ao espaço de utilização e aplicação. Normalmente o transporte de calor é realizado por um fluido de troca de calor com características específicas tais como um baixo ponto de congelamento e baixa inércia térmica. Os fluidos transportadores mais utilizados são fluidos à base de água e um composto orgânico, propilenoglicol. [18]

2.3.1 Bomba de Calor Geotérmica

Uma bomba de calor funciona através de contínuos ciclos de compressão/expansão de um fluido de trabalho (fluido frigorigéneo) onde é retirado calor a um fluido frio e transferida essa mesma energia a um fluido de temperatura superior. Energia elétrica é utilizada para através de um compressor realizar trabalho sobre o sistema por forma a concentrar e transportar energia térmica. A figura 2.7 apresenta um esquema simplificado de uma bomba de calor.

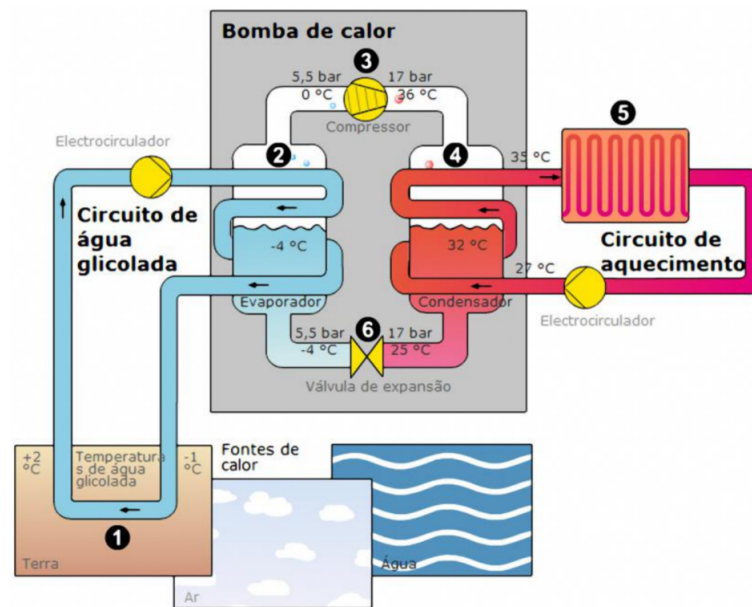


Figura 2.7: Esquema simplificado de uma bomba de calor [1]

O fluido de trabalho numa bomba de calor é normalmente um fluido refrigerante ou frigorigéneo e a sua seleção está normalmente dependente das características gerais e requisitos do sistema envolvente à bomba. Uma vez que a energia térmica apenas pode se movimentar de um nível energético mais alto para outro mais baixo, o fluido frigorigéneo deverá se apresentar a uma temperatura mais baixa que a temperatura de entrada do fluido vindo do solo. No condensador o líquido frigorigéneo apresenta também uma temperatura superior ao circuito de aquecimento. Com as necessárias considerações iniciais é então possível identificar os seguintes processos:

- Numa aproximação inicial consideremos o líquido refrigerante a baixa temperatura e baixa pressão presente no ponto 2, em estado líquido. O fluido bombeado no circuito de água glicolada passa no evaporador onde fornece energia ao fluido frigorigéneo levando à sua mudança de estado.
- Desta forma o fluido de principal chega ao ponto 3 em forma de vapor e a baixa pressão. Neste ponto o compressor irá realizar um aumento de pressão e consequentemente um aumento de temperatura.
- Assim sendo o vapor proveniente do compressor circula no condensador cedendo energia ao fluido presente no circuito de aquecimento voltando então ao estado líquido.
- Através da passagem do fluido presente no condensador pela válvula de expansão, presente no ponto 6, dá-se então a diminuição da pressão e consequentemente diminuição da temperatura. Desta forma é reiniciado o processo circular presente na bomba de calor.

Uma vez que é possível aproveitar o efeito produzido por um evaporador (válvula de expansão) para retirar calor no Verão, e o calor no condensador para fornecer calor no Inverno, é então

definido o conceito principal para aquecimento e arrefecimento segundo os componentes de uma bomba de calor. No entanto coloca-se a questão de para um duplo efeito supracitado seriam necessárias duas máquinas em operação inversa o que por sua vez aumentaria o investimento, manutenção e ocupação de espaço físico. Por forma a suprimir a necessidade de duas máquinas é então aplicada uma válvula de expansão de duplo sentido e uma válvula de quatro vias à saída do compressor para um duplo efeito. A figura 2.8 apresenta o funcionamento de bomba de calor reversível. [10]

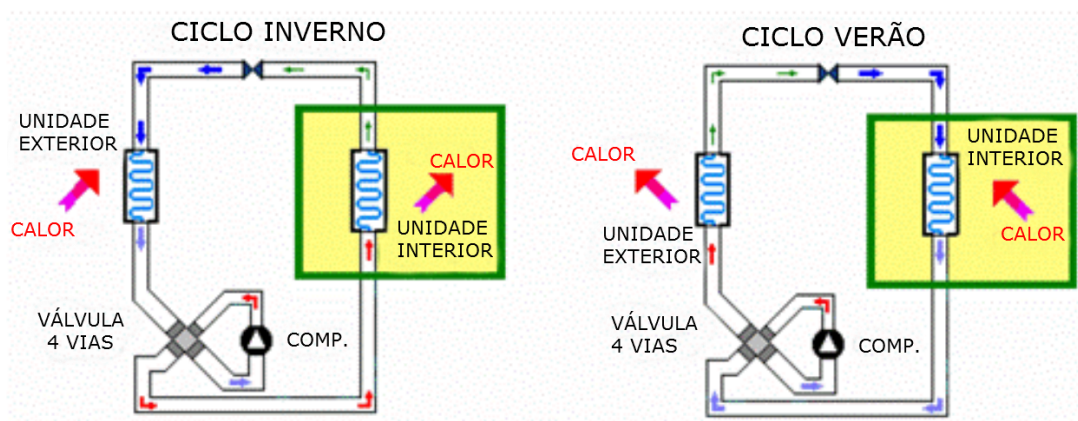


Figura 2.8: Funcionamento de bomba de calor reversível, adaptado de [10]

Os principais componentes presentes numa bomba de calor encontram-se presentes na figura 2.9. O estado do fluido frigorigéneo durante todo o ciclo é bem ilustrado num diagrama de entalpia e pressão, como aquele apresentado à direita nesta figura. As mudanças de entalpia no condensador e no evaporador indicam a taxa de transferência de calor por unidade de massa de fluido refrigerante.

A principal razão para o interesse em usar bombas de calor para fornecer aquecimento e arrefecimento é a necessidade de menos trabalho para transferir calor da fonte para o dissipador do que para converter energia primária em calor. Por outras palavras, a energia necessária para criar um gradiente é visivelmente menor do que o aquecimento ou arrefecimento fornecido. Este efeito é quantificado na termodinâmica clássica pelo coeficiente de desempenho (COP). Se Q_h for a quantidade de calor fornecida e W for o trabalho necessário, então $COP = Q_h/W$.

A termodinâmica clássica também nos diz que existe um valor máximo teórico (eficiência de Carnot) limitado pela temperatura absoluta da fonte (T_f) e carga (T_c) de modo que, $COP_{max} = T_c/(T_c - T_f)$ no modo de aquecimento. Isso significa que maiores eficiências podem ser alcançadas se a temperatura da fonte e da carga estiverem próximas, como é geralmente o caso quando se considera os edifícios e o ambiente circundante. [19]

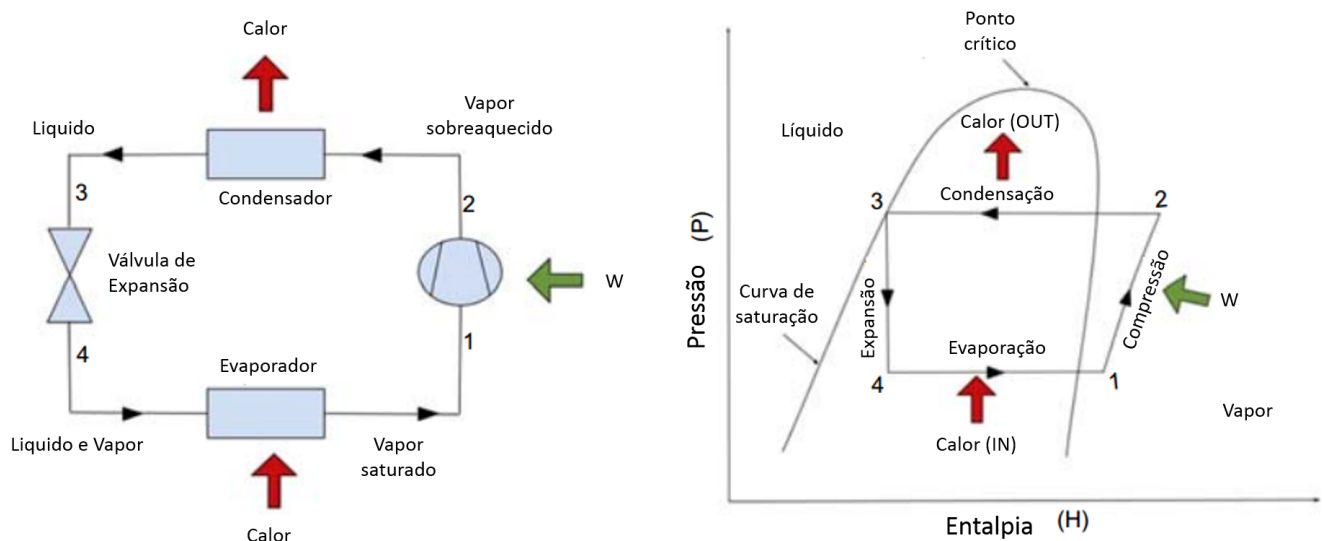


Figura 2.9: Modelo conceptual de uma bomba de calor (esquerda) e um ciclo idealizado representado segundo pressão e entalpia (direita), adaptado de [20].

De acordo com o exemplo prático presente em [21], no caso de a temperatura ambiente atingir elevados valores, a diferença de performance entre uma bomba de calor corrente e uma bomba de calor geotérmica são ainda mais evidentes. O conceito de bomba de calor geotérmica é que o calor não é descartado na atmosfera, mas num permutador de calor terrestre, onde a temperatura é muito mais baixa e constante durante todo o ano. Desta forma as bombas de calor aproveitam a temperatura constante e baixa do dissipador para maximizar o COP ou EER. A figura 2.10 apresenta uma comparação de temperaturas entre uma bomba de calor convencional e uma bomba de calor geotérmica [21].

As aplicações geotérmicas de baixa temperatura têm como objetivo fornecer energia a um fluido de alta compressibilidade e baixo ponto de vaporização por forma a transferir energia térmica a uma instalação no Inverno e o processo inverso no Verão. No entanto, apenas é possível retirar calor se a temperatura da entrada geotérmica for superior à temperatura de retorno do circuito secundário, a qual vem determinada pela instalação de aquecimento e pela temperatura exterior.

Em bombas de calor fora do conceito geotérmico, em condições normais, a diferença mínima geralmente aceite encontra-se num intervalo de 4-6 °C entre a temperatura média do fluido quente e a temperatura média do fluido frio e um salto térmico máximo de 10 °C entre a temperatura de entrada e saída do fluido que incorpora o sistema em contacto direto com o solo. Na maior parte das aplicações, os fluxos utilizados são:

- caudal de fluido geotérmico entre 65 e 165 l/h kW_t, com possível variação de temperatura entre os 13,3 e 5,3 °C
- caudal de fluido quente entre 165 e 195 l/h kW_t, com possível variação de temperatura entre os 5,3 e 4,4 °C

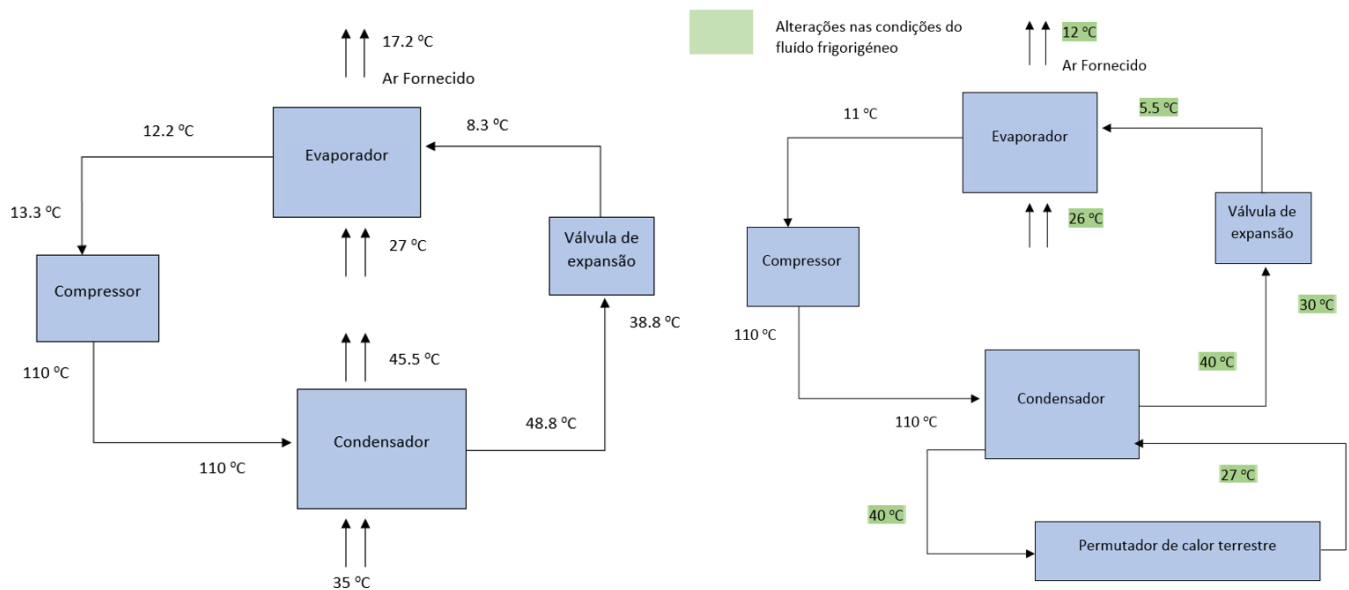


Figura 2.10: Comparação de temperaturas entre uma bomba de calor convencional (esquerda) e uma bomba de calor geotérmica (direita) [21].

No entanto, uma bomba de calor geotérmica permite evitar os limites evidenciados acima e explorar o potencial do solo, que em princípio seria duvidoso devido à sua baixa temperatura e permite ainda explorar o recurso a uma temperatura mais baixa que o normal. De momento contribuem dois fatores importantes que propiciam a implementação deste tipo de bombas: a existência de uma ampla gama de bombas de calor de diferentes tipos e gama de potências a preço continuamente mais acessível que não exigem uma instalação complicada ou mão de obra excessivamente qualificada para instalação e manutenção; e por outro, a existência de maiores áreas de exploração para geotermia de muito baixa temperatura. [10]

2.4 Permutadores de Calor Terrestres

Uma grande percentagem do custo inicial relacionado com a instalação de um sistema de climatização e AQS com recurso a geotermia está relacionado com a instalação do permutador de calor terrestre. É comum que os permutadores sejam sobre dimensionados devido a incertezas quanto às características do solo e à real necessidade de aquecimento/arrefecimento do ciclo. Reduzir estas incertezas poderá reduzir o custo inicial e aumentar a viabilidade económica do projeto [22].

Os sistemas geotérmicos superficiais tiram partido das temperaturas moderadas e estáveis do solo para incrementar a eficiência e, deste modo, reduzir os custos operacionais de sistemas de aquecimento e de refrigeração. A temperatura da atmosfera apresenta uma variação diária e anual mais alargada comparativamente ao solo [23].

Tomando uma rotina diária, a temperatura do solo varia consideravelmente em profundidades inferiores a 0.8m, no entanto, quanto maior a profundidade menor a variação [24]. As variações mais relevantes observam-se num espaço de tempo maior, nomeadamente nas estações ocorrentes ao longo do ano. A título de exemplo é possível observar a imagem 2.11 onde é apresentada a alteração de temperatura do solo no ano segundo o aumento de profundidade. A profundidade à qual a temperatura permanece constante irá depender de fatores como a radiação solar incidente, a existência ou não de neve, a temperatura do ar atmosférico, a precipitação e as características térmicas do solo [16].

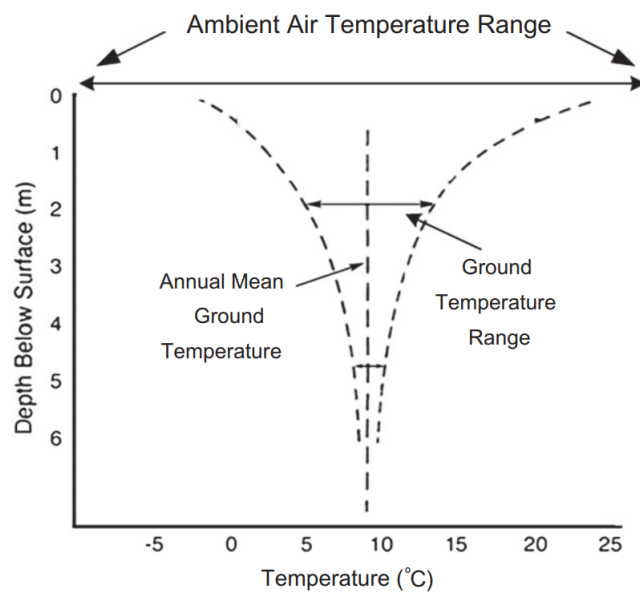


Figura 2.11: Exemplo da variação da temperatura do solo de acordo com a profundidade em Ottawa, Canada [16].

Uma vez conhecidas as características do solo quanto à geologia e hidrogeologia, será possível então determinar o permutador geotérmico ideal tendo em conta a realidade e necessidade do edifício. A transferência de calor do solo, ou para o solo, pode ser efetuada em sistemas fechados através de permutadores de calor enterrados (verticais, horizontais ou incorporados nas fundações do edifício - fundações termo ativas), ou através de sistemas abertos com a extração de água subterrânea que troca calor com um permutador de calor na superfície, sendo posteriormente injetada no aquífero.

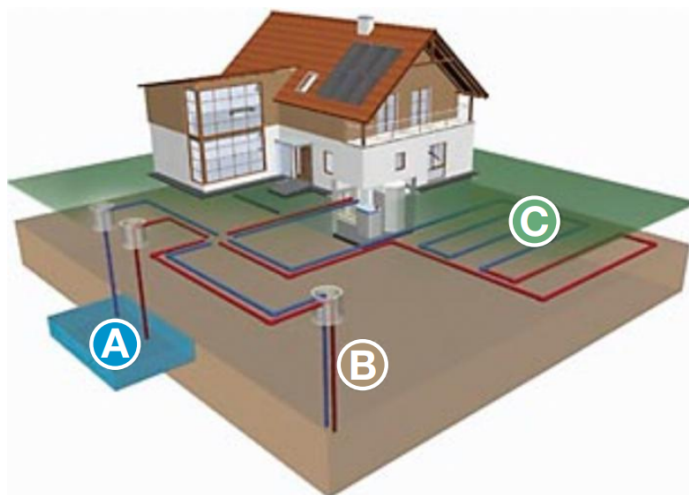


Figura 2.12: Representação esquemática de sistemas geotérmicos superficiais abertos (A), fechados verticais (B) e fechados horizontais (C) [1].

2.4.1 Sistemas de circuito fechado

Embora existam várias configurações possíveis, os sistemas geotérmicos fechados poderão ser classificados de acordo com o tipo de sistema de troca de calor com o solo: geotermia vertical, geotermia horizontal e fundações termo ativas [8]. Relativamente aos sistemas verticais e horizontais estes podem ser implementados em série ou em paralelo. Tanto um sistema como outro irão apresentar vantagens e desvantagens sendo de realçar a tabela 2.1.

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens da configuração em série e paralelo

	Vantagens	Desvantagens
Série	<ul style="list-style-type: none"> - Trajetória perfeitamente definida; - O ar preso pode ser eliminado com grande facilidade (purga); - Maior desempenho térmico por metro linear de tubo, uma vez que é necessário um diâmetro maior 	<ul style="list-style-type: none"> - Um diâmetro maior é necessário para o tubo, o que implica uma maior quantidade de fluido e anticongelante (se houver), ou seja, aumenta o custo da instalação; - Comprimento limitado devido à queda de pressão do fluido
Paralelo	<ul style="list-style-type: none"> - Menor custo de instalação, diminuindo os diâmetros necessários e a quantidade de fluido 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuidados especiais devem ser tomados para eliminar o ar que possa estar preso - Problemas para equilibrar o fluxo nos diferentes loops

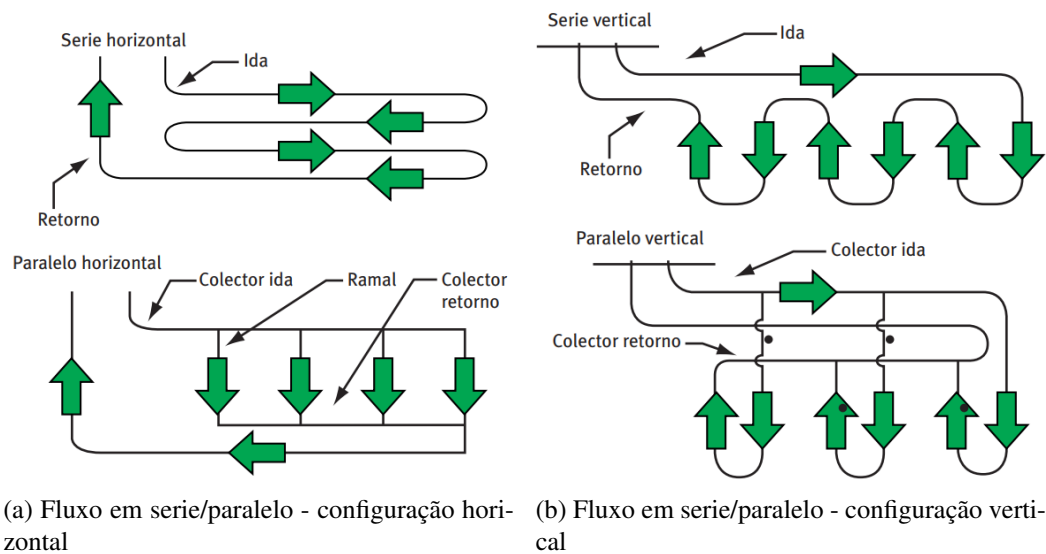


Figura 2.13: Tipo de configuração de trajetórias de fluxo em permutadores de calor terrestres [25]

O sistema horizontal baseia-se no aproveitamento da zona superficial do solo normalmente aplicado em instalações de baixa potência e elevado disponibilidade de superfície [25]. Estas instalações são normalmente realizadas com maquinaria de escavação normalmente aplicada em fundações e outras necessidades normais de alteração do solo, sendo também de ressaltar que mais nenhuma maquinaria específica será necessária para a instalação da tubulação sendo a profundidade aplicada normalmente entre 1 a 2 metros. As formas mais simples consistem em pares de tubos retos em loop ou dobrados de forma a realizar o melhor aproveitamento possível da área disponível.

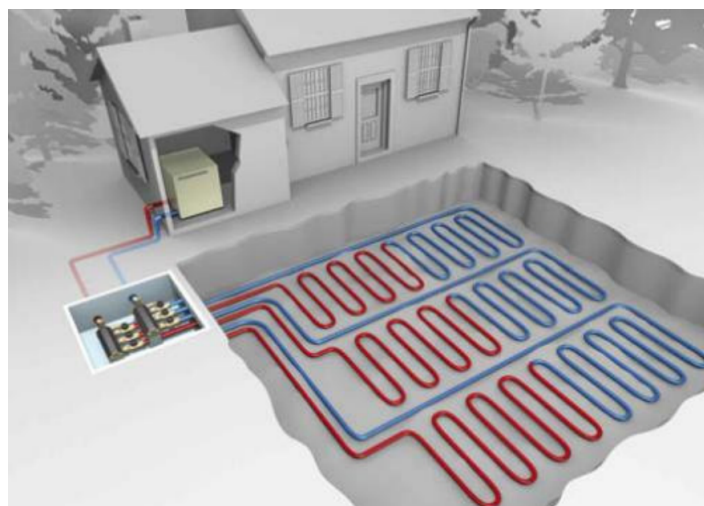


Figura 2.14: Ilustração de um permutador de calor terrestre horizontal [26].

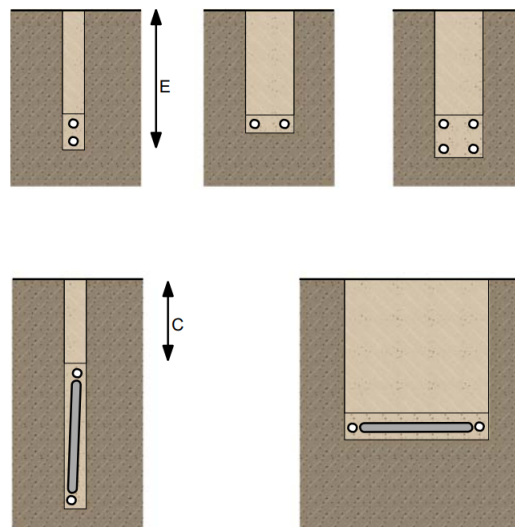
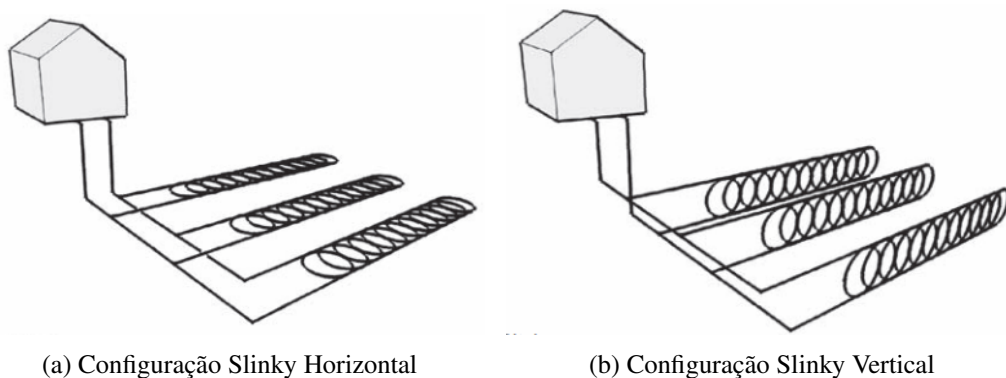


Figura 2.15: Formatos mais comuns de permutadores horizontais. E normalmente entre 1-2m e $C > 0.75$ dependendo das condições de formação de gelo [27]

Uma vez que as tubulações normalmente aplicadas rondam os 25-32 mm de diâmetro e produzidas em espiral, será então relativamente fácil aplicar a tubulação em formato Slinky¹, podendo ser disposto na horizontal ou vertical. Esta disposição apresenta a vantagem de aumentar a área de transferência de calor por comprimento de fileira o que será vantajoso e diminuirá a área necessária. No entanto irá levar a uma queda de pressão no circuito e então aumentar a energia requerida pela bomba. Será então necessário tomar cuidados reforçados no dimensionamento do sistema [27].



(a) Configuração Slinky Horizontal

(b) Configuração Slinky Vertical

Figura 2.16: Tipo de configuração tubular horizontal - em formato Slinky [27]

Uma série de limitações irão recorrer da aplicação de um sistema horizontal a saber:

- A utilização de uma superfície de terreno adicional com uma escavação adicional;

¹Slinky é uma marca registrada em Poof-Slinky Inc., 45400 Helm St., Plymouth, MI, USA

- Restrições na utilização do terreno selecionado pois uma vez enterrada a tubulação não será admitido nenhuma vegetação com ramificações;
- A humidade do solo deverá ser cuidadosamente considerada no dimensionamento, especialmente em solos arenosos ou no topo de montes uma vez que facilmente secam no Verão;
- Rochas e outras obstruções perto da superfície poderão tornar a escavação impraticável;
- Irá apresentar um obstáculo para qualquer serviço adicional que deverá atravessar o solo, nomeadamente redes telefónicas, TV por cabo, linhas de esgoto, etc) [25, 28].

De acordo com [28] a área mínima necessária para uma configuração horizontal convencional para uma habitação média será de cerca de 2000 m² o que leva a que não raras vezes esta aplicação não seja possível em meios urbanos com reduzidos terrenos. A maior parte das instalações utiliza uma configuração em paralelo e o tempo necessário para a sua instalação não será muito diferente daquele utilizado numa instalação vertical.

As vantagens deste formato deverão também ser realçadas, a notar:

- Custo de escavação baixo uma vez que não seria sequer equivalente a 15% do investimento total, incluindo a bomba de calor;
- Instalação menos dispendiosa que o sistema vertical uma vez que as plataformas de perfuração continuam com um preço mais elevado que as máquinas de movimentação de solo superficial;
- Baixo potencial de contaminação de aquíferos dada a baixa profundidade;
- Grandes sondas de perfuração poderão não ser apropriadas a certos locais devido ao seu tamanho e peso;
- Não requer instalações externas;
- De momento não requer permissões e autorizações especiais, além de permissão de trabalho;
- É limpo e ecológico. Na movimentação do solo originado, o volume escavado é reabastecido com o preenchimento do vazio originado com materiais não prejudiciais para o ambiente;
- A manutenção da rede de coletores é praticamente zero [25, 28].

Tabela 2.2: Exemplo de bombas de calor geotérmicas e respectivos parâmetros técnicos (Temperatura entrada do fluido na fonte: 30 °C Arrefecimento/10°C Aquecimento), retirado de [28]

GSHP Cooling Equipment and System Description	Rated COP	Evap. Type	Fan Power, kW	Cond. Pump, kW	CW Pump, kW	Parasitic Heat, kW	System COP
13.6 kW WAHP, 24/17°C EAT	4.8	7°C DX	0.63	0.21	—	−0.63 (4%)	4.0
35 kW WWHP; 1900 L/s, 1 kPa AHU	4.0	7°C CW	3.36	1.07	1.07	−4.4 (12.6%)	2.3
35 kW WWHP; four 470 L/s, 0.25 kPa FCUs	4.0	7°C CW	1.8	1.07	1.07	−2.9 (8.0%)	2.8
1760 kW chiller, 1 kPa AHUs, 0.5 kPa return fans, series FPVAV	7.0	7°C CW	314	27	36	−350 (20%)	2.2
1760 kW chiller, 200 to 470 L/s, 0.25 kPa FCUs	7.0	7°C CW	90	27	36	−126 (7.2%)	3.8

GSHP Heating Equipment and System Description	Rated COP, kJ/Wh	Cond. Type	Fan Power, kW	Cond. Pump, kW	CW Pump, kW	Parasitic Heat, kW	System COP
14 kW WAHP, 21°C EAT	5	Dir.	0.63	0.21	—	−0.62 (4.4%)	4.0
35 kW WWHP; 1900 L/s, 1 kPa AHU	4	49°C HW	3.36	1.07	1.07	−4.2 (12.0%)	2.5
35 kW WWHP; four 470 L/s, 0.25 kPa FCUs	4	49°C HW	1.57	1.07	1.07	−2.4 (6.9%)	2.8
35 kW WWHP; 1900 L/s, 1 kPa AHU	4	38°C HW	3.36	1.07	1.07	−4.2 (12.0%)	3.1
35 kW WWHP, in-floor heat	4	38°C HW	0	1.07	1.07	−1.1 (3.1%)	3.7

A impossibilidade de dispor de terreno suficiente para estender os coletores horizontais, bem como a possível ausência de solo sobre a massa rochosa, e as licenças que implicam a instalação de coletores horizontais ao atravessar terrenos adjacentes, ou a presença de melhores condições de captura da terra, são algumas das razões que podem desencorajar a instalação de permutadores horizontais. Nestes casos, uma instalação vertical deverá ser a opção em consideração.

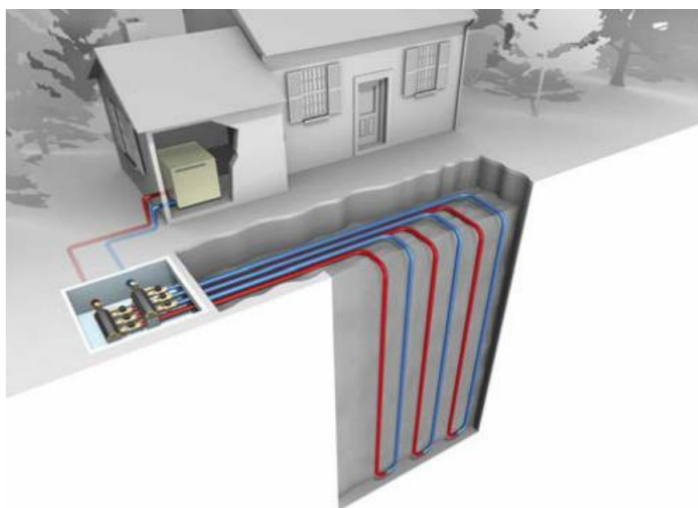


Figura 2.17: Ilustração de um permutador de calor terrestre vertical [26].

Os permutadores de calor terrestres verticais consistem na execução de uma ou várias perfurações nas quais permutadores de calor serão introduzidos. O comprimento da perfuração varia entre 60 e 150 m aproximadamente, e perfura diâmetros de 10 a 20 cm, dependendo da regulamentação em aplicação no dimensionamento. Cada uma dessas perfurações, equipadas com permutadores,

é denominada de perfuração geotérmica. Esse tipo de permutador é o mais comum na maioria dos territórios, tanto na Europa quanto no resto do mundo, embora em muitos casos sejam considerados campos de permutadores dada a quantidade de troca de energia com o solo. Os campos de permutadores são usados no caso de serem exigidas grandes potências devido ao elevado número de casas ou grandes edifícios. Normalmente correspondem a grupos de 4 a 50 sondas geotérmicas, dispostas o mais próximo possível das instalações ou abaixo das mesmas, com profundidades de 50 a 300 m dependentes da potência requerida e das condições geológicas locais. [8]

Para aumentar a transferência de calor, o espaço entre os tubos e a parede da perfuração é preenchido com um material de argamassa bombeável. Para uma aplicação residencial típica, o espaçamento entre furos é de cerca de 5-6 m, a fim de evitar que exista interferência nos fluxos térmicos de uma perfuração para outra. Para assegurar fluxos iguais para múltiplos sistemas de perfuração, é utilizado um sistema de permutadores em rede, que pode estar localizado no edifício ou enterrado no terreno adjacente. Uma vantagem da configuração do loop vertical é a área de instalação reduzida, tornando-os vantajosos onde o espaço é limitado. Outro incentivo para estes sistemas é a baixa perturbação da paisagem, já que a perfuração tem um impacto reduzido em comparação com a abertura de valas. Além disso, a localização da tubulação no subsolo, onde a temperatura é constante durante todo o ano, permite um desempenho consistente da bomba de calor e reduz o comprimento total do circuito. A principal desvantagem do uso de um sistema vertical é o custo de instalação, já que a perfuração é normalmente mais cara do que valas horizontais. [29, 30]

O principal sistema de permutador de calor terrestre utilizado tem sido o formato vertical. No entanto recentemente as estruturas de fundação têm vindo a ser utilizadas, aplicando também um sistema de transferência de calor normalmente designado como *pile foundation GHE* ou *energy pile* [31, 32]. Neste tipo de permutador o diâmetro da perfuração é maior que o furo tradicional e os tubos em U são trocados por tubos em espiral [33, 34]. O fluxo de transferência de calor por metro de perfuração é maior que o permutador vertical tradicional, no entanto, na maioria dos casos, é necessário recorrer à utilização de ambos os sistemas uma vez que o número de estruturas de fundação não são suficientes para a carga de transferência necessária. Este tipo de sistema leva normalmente a uma menor área destinada ao sistema de permutador de calor vertical e é normal se dar uma redução dos custos de perfuração.

2.4.2 Sistemas de circuito aberto

Os sistemas de troca de calor de circuito aberto interagem diretamente com o solo. Estes sistemas usam águas subterrâneas ou superficiais locais, como lagos e lagoas, como meio de transferência direta de calor. A água é extraída e flui através do permutador da bomba de calor e, em seguida, descarregada de volta para a fonte ou no solo para irrigação. Atualmente já se encontra em desenvolvimento o uso de água em minas abandonadas dado o seu potencial de armazenamento térmico. Desta forma é possível aquecer as cidades de forma barata usando a tecnologia de bombas de calor. Os sistemas abertos tendem a ser usados em grandes instalações. Existem três

configurações comuns de circuito aberto: apenas poços de extração, poços de extração e reinjeção, e sistemas de águas superficiais. A configuração mais comum apresenta poços de extração e reinjeção (Ver figura 2.18).

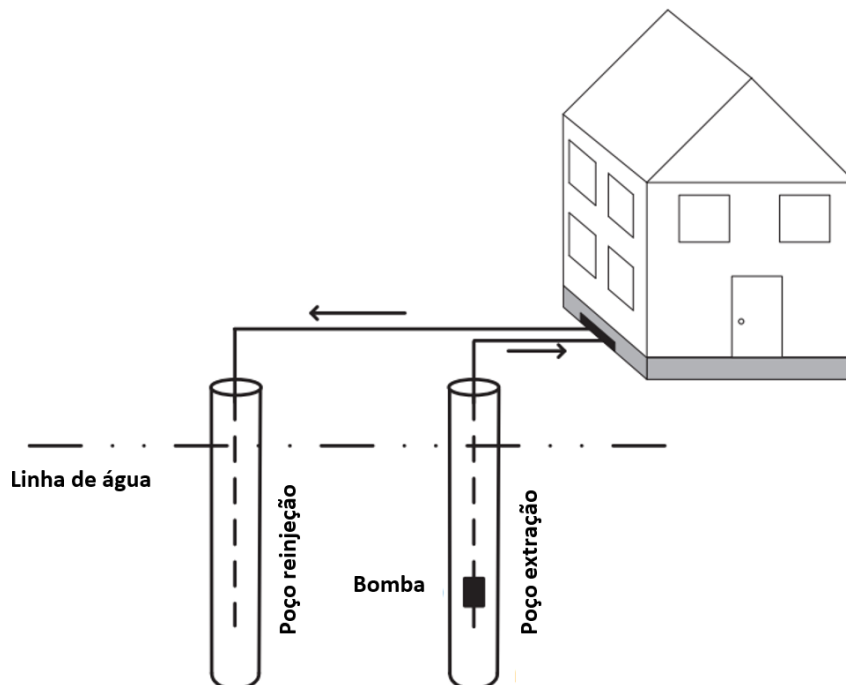


Figura 2.18: Permutador de calor terrestre aberto com poço de reinjeção e extração [16]

A água é extraída de um poço de extração que chega ao lençol freático e, depois de passar pelo permutador da bomba de calor, é injetada no lençol freático a uma distância do poço de extração suficiente para permitir a transferência adequada de calor do solo para o lençol freático entre os poços [35]. A reinjeção pode ser excluída pois a drenagem aberta apresenta baixo custo. No entanto requer que a fonte tenha uma alta capacidade de transferência de calor e renovação relativamente ao consumo a fim de proporcionar um uso prolongado [36]. A taxa de fluxo de água para a unidade de bomba de calor é geralmente entre 5,7 e 11,4 litros por minuto por tonelada de capacidade de aquecimento. Uma vantagem das configurações de circuito aberto é que as temperaturas da fonte de água permanecem quase constantes. Também as perdas associadas ao permutador de calor extra necessário para sistemas de circuito fechado são evitadas, aumentando o *Coefficient of Performance* (COP) da bomba de calor geotérmica [24]. Dependendo do método de extração usado, o circuito aberto pode ter altas cargas de bombeamento e COP global alto, reduzindo os custos operacionais. Além disso, os sistemas de circuito aberto requerem menos perfuração do que os circuitos fechados verticais e possuem projetos de ligação ao solo mais simples e custos iniciais associados mais baixos. A quantidade de água que pode ser extraída para sistemas de malha aberta é algumas vezes limitada pelos regulamentos locais de recursos hídricos [35]. A principal desvantagem dos circuitos abertos é a necessidade de proteger a qualidade da água, geralmente seguindo os regulamentos de água limpa e água superficial o que por vezes leva a que sistemas

de circuito aberto não sejam permitidos [24]. Nestes casos o permutador da bomba de calor e o circuito externo implementado encontram-se sujeitos à corrosão, entupimento e descamação o que implica uma fonte de fluido com enquadramento químico razoavelmente neutro e uma baixa quantidade de minerais, como o ferro por exemplo [37]. Caso as características químicas presentes na água não sejam neutras é então exigida maior manutenção e consequentes custos e aumento do envolvimento do proprietário [35].

2.5 Geotermia Superficial na Europa

A aplicação de energia geotérmica apresenta uma solução alternativa para o cumprimento das metas europeias em termos de eficiência energética uma vez que se estima que cerca de 40% do consumo europeu de energia na área de climatização e produção de AQS. Para além disso também poderá contribuir para uma redução das emissões de gases de efeito de estufa e, por consequência, ser benéfico relativamente às alterações climáticas existentes [1].

Considerando o estado atual e as perspetivas realizadas é possível afirmar que a situação relativa à implantação da tecnologia de GSHP mudou em vários aspetos ao longo da última década. Esta alteração tem sido apontada como causa da reformulação da política energética na Europa e de um crescimento económico significativo na China na última década o que impulsionou a adoção da tecnologia até ao ponto atual. Inquéritos mundiais de desenvolvimento de bombas de calor geotérmicas foram relatados em intervalos de cinco anos desde 1975 [38,39] e, após a introdução da Diretiva RES na Europa em 2009, as estatísticas dos Estados-Membros são comunicadas anualmente à agência Eurostat e também publicadas pela EurObserv'ER [40], pelo que o estado atual da implantação da tecnologia é relativamente bem compreendido. O estado de implementação em 2015 nos Estados Unidos, China e Europa é mostrado na figura 2.19 em termos do número de sistemas instalados sendo mais de 90% residencial. Na figura 2.20 os dados surgem numa base per capita.

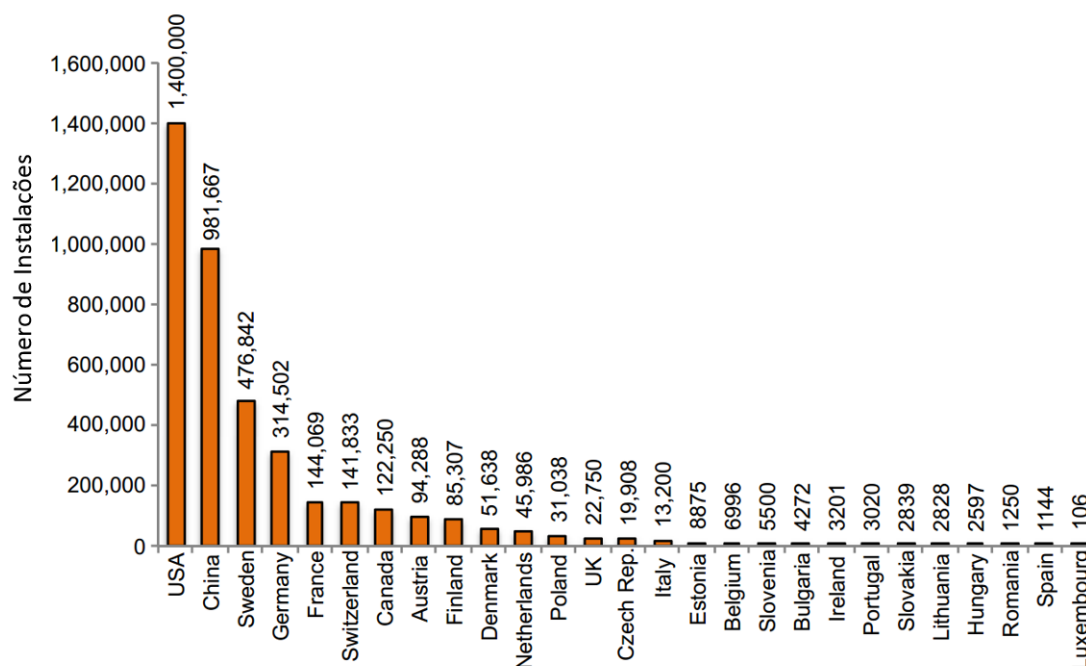


Figura 2.19: Número de instalações com bomba de calor geotérmica na América do Norte, Europa e China em 2014, adaptado de [27] e base científica em [39, 40]

Os dados presentes na figura 2.19 mostram que, atendendo aos dados de anos anteriores, é observável um crescimento razoável nos Estados Unidos ao atingir 1,4 milhões de instalações e no caso da China o caso será mais vincado uma vez que se apresenta com o segundo maior número de instalações ainda que no ano 2000 tenha sido indicada nenhuma instalação.

Ao avaliar os dados relativamente ao quociente populacional (Figura 2.20) é introduzida uma variação no valor interpretativo e é possível então obter uma melhor indicação da penetração da tecnologia e sensibilidade a este tipo de solução em cada um dos países. Será expectável que a Suíça e os países escandinavos apresentem um alto nível nesta comparação dada a sua entrada antecipada no mercado no último século e também ao seu clima mais frio. A Dinamarca tem um clima mais temperado do que os outros países escandinavos, mas ainda assim apresenta cotação elevada neste ranking. Esta situação poderá sugerir um potencial similar para absorção do mercado em outros países europeus com climas semelhantes mas que atualmente mostram baixos níveis de integração da tecnologia. Quanto a países do sul da Europa as condições serão diferentes uma vez que as exigências se prendem maioritariamente com necessidades de arrefecimento. Embora existam semelhanças climáticas com partes dos Estados Unidos que têm altos níveis de aplicação de bombas de calor geotérmicas, os projetos residenciais e as expectativas dos consumidores são diferentes e a aceitação em muitos países acaba por estar abaixo do que seria expectável dadas as condições atuais relativamente à origem e utilização da energia num enquadramento mundial.

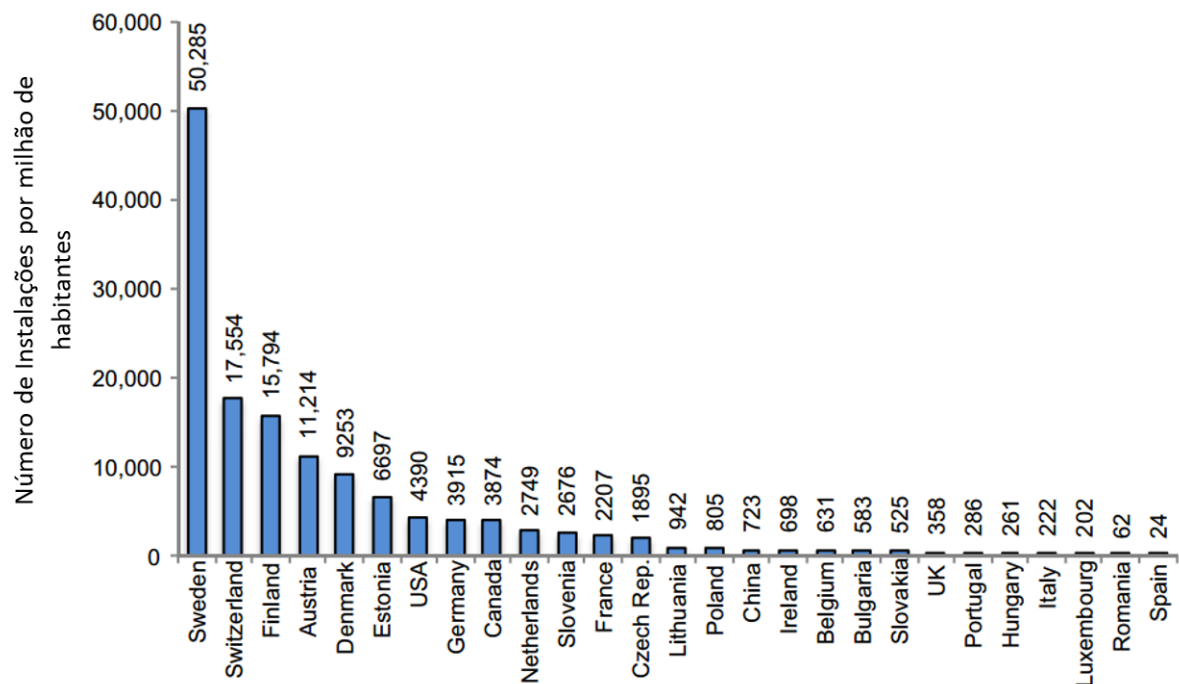


Figura 2.20: Número de instalações com bomba de calor geotérmica por milhão habitantes na América do Norte, Europa e China em 2014, adaptado de [27] e base científica em [39,40]

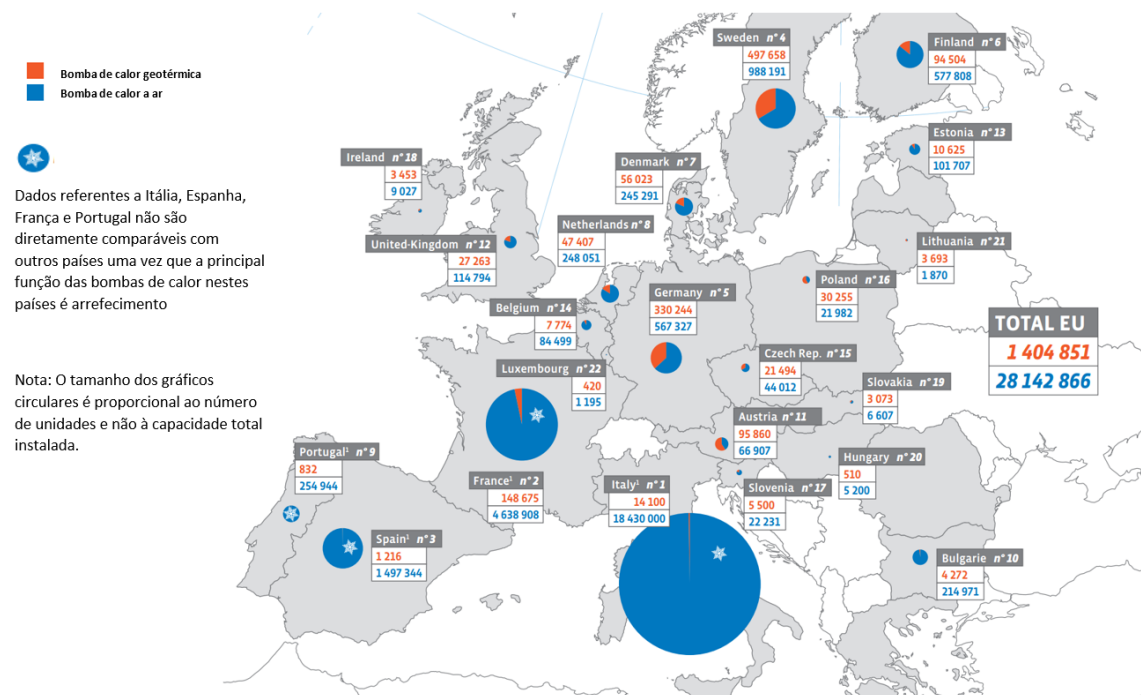


Figura 2.21: Mapa de instalações com bomba de calor geotérmica e ar na Europa em 2015 [41]

2.6 Geotermia em Portugal Continental

As características climáticas presentes no país e a implementação de condições favoráveis à aposta noutras fontes energéticas renováveis, como a energia eólica e a fotovoltaica, levaram a que o desenvolvimento da energia geotérmica tenha se atrasado relativamente a outros países europeus tais como a Islândia ou Turquia, países esses que apresentam até à data maior capacidade instalada na Europa para aplicações de climatização [42]. Para além disso também será relevante a insuficiente experiência nacional no desenvolvimento dos projetos geotérmicos, em concordância com hesitações negociais por parte de investidores [43]. Atendendo ao estado atual do conhecimento das condições geotérmicas nacionais e ao desenvolvimento tecnológico passível de execução e exploração, apenas se encontram reunidas condições para o aproveitamento de baixa entalpia em território português [1].

A atividade tectónica em Portugal Continental é relativamente baixa o que leva a que não sejam esperados reservatórios de alta entalpia. No entanto, são frequentes as ocorrências geotérmicas superficiais com temperatura superior à média das águas superficiais. Assim sendo, é possível observar a existência de ocorrências geotérmicas de baixa entalpia. As temperaturas variam entre os 30 e 76 °C. As ocorrências geotérmicas de muito baixa entalpia, com temperaturas entre 20 e 29°C também são notadas no país. A figura 2.23 apresenta as ocorrências geotérmicas em Portugal Continental de acordo com a sua localização e temperatura [1]. A figura indicada apresenta predominância de ocorrências no norte e centro do país. A figura 2.22 apresenta a distribuição do número de ocorrências geotérmicas em função da temperatura. A temperatura de ascensão máxima registada não excede os 76°C e verifica-se uma predominância entre os 20°C e os 40°C.

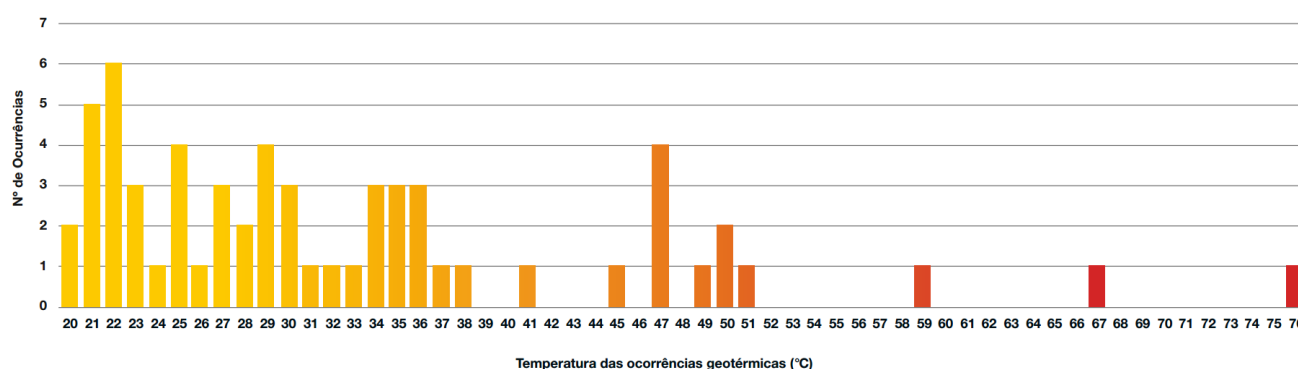


Figura 2.22: Distribuição do numero de ocorrências geotérmicas de baixa entalpia em função da temperatura, em Portugal Continental [1]

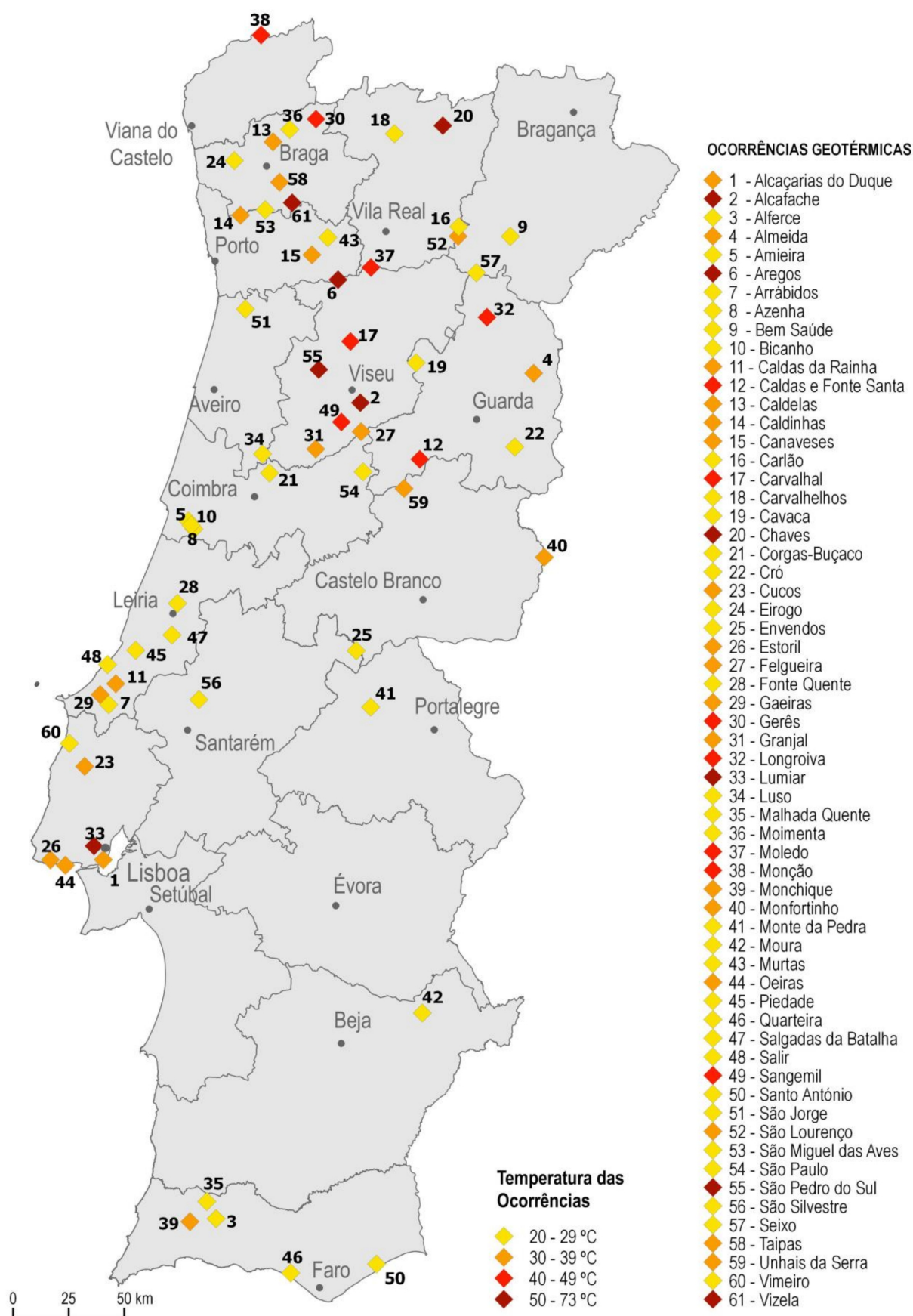


Figura 2.23: Distribuição no mapa nacional das ocorrências geotérmicas em Portugal Continental [1]

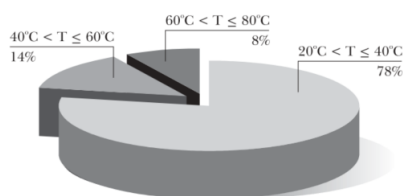


Figura 2.24: Distribuição das ocorrências termais com temperatura $> 20^{\circ}\text{C}$ [43]

À exceção da produção energética na Ilha de São Miguel (Açores), as características geológicas de Portugal Continental permitiram até ao momento a aplicação de usos diretos da geotermia em zonas de polos termais ressaltando-se no entanto o recente desenvolvimento da Geotermia Superficial (GS) [7]. De acordo com [44], à data da publicação, os vários aproveitamentos geotérmicos aplicados em usos diretos produziram cerca de 385 TJ/ano e as 24 instalações de bombas de calor geotérmico produziram cerca de 386,4 TJ/ano. Ou seja, a potência instalada com GSHP foi superior às aplicações de uso direto. O aumento da utilização de recursos geotérmicos pode constituir uma atividade económica atrativa num contexto de crise económica, uma vez que a energia pode ser aplicada num formato regional de redes de aquecimento urbano ou industrial, com efeitos positivos no desenvolvimento da economia e criação de emprego [7].

No entanto, apesar da situação económica nacional, tem vindo a ser desenvolvida e reformulada a política energética com benefícios abrangentes à última década. Como resultado tem-se observado uma maior atividade económica no setor energético, o aumento da implantação de energia renovável e maior incidência na eficiência energética. Através da superação das barreiras presentes resulta o desenvolvimento do Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PANEE) e o Plano Nacional de Acção para Energias Renováveis (PANER). [45].

Estudos de viabilidade estão a ser realizados por forma a desenvolver as condições adequadas para a implementação correta de sistemas geotérmico. Nas bacias sedimentares, principalmente na área de Lisboa devido à necessidade energética da região, são estudados os reservatórios do Cretácio Inferior com temperaturas até 50°C . Estes locais são adequados para variadas aplicações, no entanto, dificuldades técnicas resultaram em abrandamento dos processos existentes. Contudo o potencial para o desenvolvimento de bombas de calor geotérmicas, incidentes em aquíferos, é alto por todo o país [46].

2.6.1 Atlas Geotérmico Nacional

A reduzida evolução mas consistente da área de *GSHP* levou a que um trabalho mais eficaz e relevante relativamente à divulgação e aprofundamento do conhecimento do geotermismo nacional tenha sido levado a cabo. O trabalho desenvolvido até ao momento pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) proporciona um ambiente positivo à alteração de estratégias no país relativamente a este tipo de energias e sejam originadas sinergias para o desenvolvimento próspero e consistente do sector.

Por forma a dinamizar o sector e oferecer mais informação em quantidade e qualidade, a cartografia geotérmica foi para além dos tradicionais parâmetros de Densidade e Fluxo de Calor. É agora disponibilizada informação relativamente a Temperaturas em Profundidade com a inclusão de dados disponibilizados pelas atividades de prospeção mineira, geológica, hidrológica, Testes de Resposta Térmica (TRT) e também por projetos de geotermismo locais e/ou regionais. Será de ressaltar que todas as informações disponíveis têm como objetivo primário servir a maior variedade de enquadramentos geotérmicas possíveis tais como a Geotermia de Superfície ou a Geotermia de Profundidade tendo em conta também especificidades relativamente à dimensão dos projetos e requisitos de informação específicos a determinadas tecnologias. Exemplo: temperaturas para profundidades da ordem dos quilómetros para proceder a estudos de *EGS* [7].

Por forma a entender melhor a dinâmica de informação do Atlas Geotérmico Nacional é colocada em evidência a figura 2.25.



Figura 2.25: Projetos e fontes de informação utilizados no Atlas Geotérmico Nacional

Segundo [7], o potencial geotérmico não estará só relacionado com a distribuição da localização das ocorrências de águas termais identificadas na zona norte e centro, e com os aquíferos profundos das bacias sedimentares ocidental e meridional. O potencial geotérmico estará também relacionado com outras características exógenas ao local como a procura energética, a temperatura superficial e o tipo de utilização do solo. O desenvolvimento de projetos de EGS, referentes a geotermia de profundidade (perfurações superiores a 400m) é um dos casos. Este tipo de aplicação terá como fim produção elétrica, processos industriais e águas quentes. Desta forma, o Atlas Geotérmico Nacional tem como orientação o processamento de informação com o intuito de dar a conhecer a possíveis investidores neste potencial as condições presentes. Serve como exemplo o trabalho realizado na região de Lisboa, presente em [47].

Em qualquer uma das situações, a cartografia apresentada é uma ferramenta oportuna para o desenvolvimento de projetos geotérmicos e apresenta uma necessidade continua de recolha e processamento de dados em qualquer que seja a profundidade da geotermia e/ou entalpias presentes.

2.6.2 Localização e modos de ocorrência

A utilização tradicional de recursos geotérmicos apresenta-se deficitária e insuficiente uma vez que está limitada a áreas com condições geológicas favoráveis. Esta situação foi ultrapassada com o aproveitamento do calor presente no subsolo através da aplicação de geotermia superficial de muito baixa entalpia. Este tipo de aplicação apresenta potencial em largas áreas uma vez que depende apenas das características térmicas e geológicas do subsolo [7].

O território nacional apresenta heterogeneidade no seu enquadramento hídrico e geológica. Caso consideremos como recurso geotérmico temperaturas de solo superiores a 20°C poder-se-á afirmar que Portugal Continental apresenta características passíveis de aproveitamento energético.

O Laboratório Nacional de Energia e Geologia apresenta uma infra-estrutura de serviços integrados de suporte à gestão e visualização de dados espaciais, que visa disponibilizar, em ambiente web, a informação georreferenciada relacionada com as diferentes atividades por si elaboradas [48].

O Atlas Geotérmico Nacional apresenta um mapa do território nacional com variadíssimos parâmetros de consulta tais como cartas geológicas, ocorrências e recursos minerais, atlas de potencial eólico, base de dados de recursos hidrogeológicos entre outros.

Para o objetivo em questão foram observadas informações relativas à geotermia do país nomeadamente:

- Origem dados
- Gradiente geotérmico
- Temperatura segundo profundidade
- Falhas tectónicas
- Termas e ocorrências termais

Ao observar o Atlas Geotérmico presente na figura 2.26 é possível verificar as inúmeras ocorrências termais a norte, as prospeções de petróleo na costa centro e os furos mineiros na região alentejana porém ainda não existem pontos de referência relativamente à zona do Ribatejo. (Ver figura 2.26a) Relativamente ao gradiente geotérmico nacional é possível observar um aumento progressivo do aumento de variação de temperatura do interior para o litoral, com destaque para a extensão que se inicia no Cabo Mondego até à ponta de Sagres (Ver figura 2.26b). O gradiente registado nesta extensão encontra-se em torno de 25 °C/km. A região a verde mais escuro apresenta o gradiente mais baixo com um valor aproximado de 19 °C/km. Relativamente à figura 2.26c é possível verificar falhas ao longo de toda a costa e especial destaque nos cavalgamentos presentes na zona do Minho. A zona ribatejana não apresenta ruturas no tecido geológico.

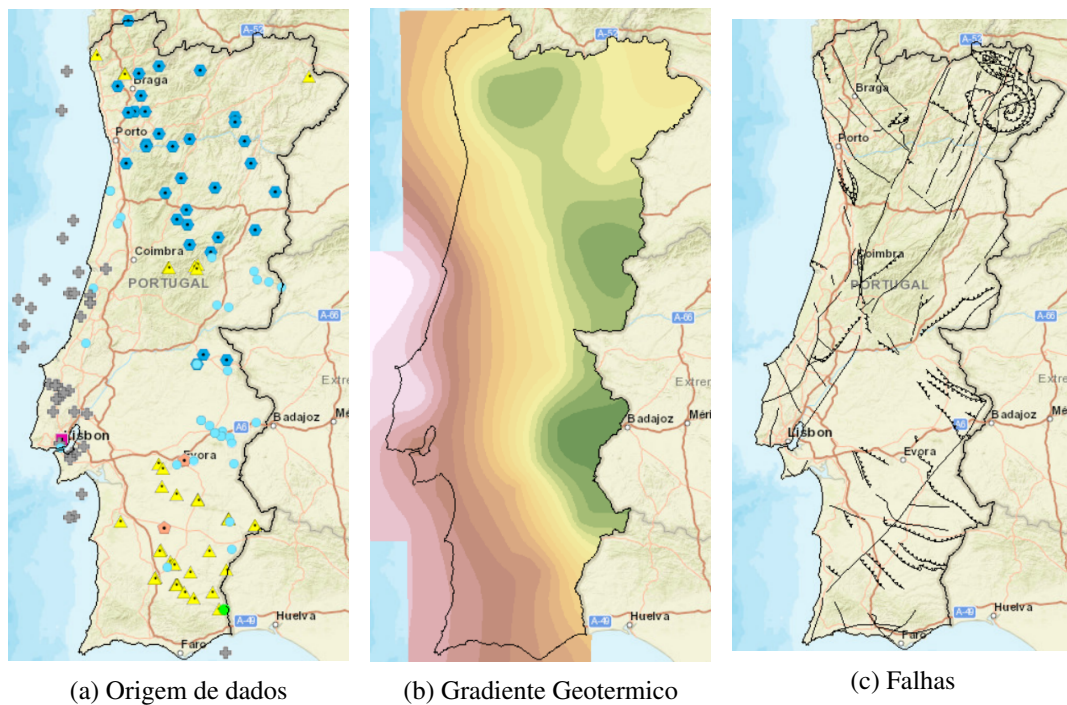


Figura 2.26: Exemplos de mapas presentes no Atlas Geotermico [48]

A grande maioria das ocorrências geotérmicas encontram-se ligadas a falhas de grande extensão e que provavelmente registam grandes profundidades na crosta. A figura 2.27 apresenta um enquadramento tecno-estratigráfico das ocorrências geotérmicas e principais estruturas ativas em Portugal Continental. A morfologia em formato de bloco e a fracturação elevada, em conjunto com a litologia composta por rochas graníticas e rochas sedimentares metamorfizadas levam às condições de baixa entalpia e muito baixa entalpia registadas na zona Centro-Ibérica. Esta zona regista também os maiores índices de pluviosidade anual. O registo pluviométrico e as condições morfotectónicas apresentadas contribuem para que 63 % das ocorrências geotérmicas nacionais se encontrem nesta região. A figura 2.28 apresenta as aplicações nas ocorrências geotérmicas em Portugal Continental [1]. A figura 2.29 apresenta a carta geológica das ocorrências geotérmicas em Portugal Continental.

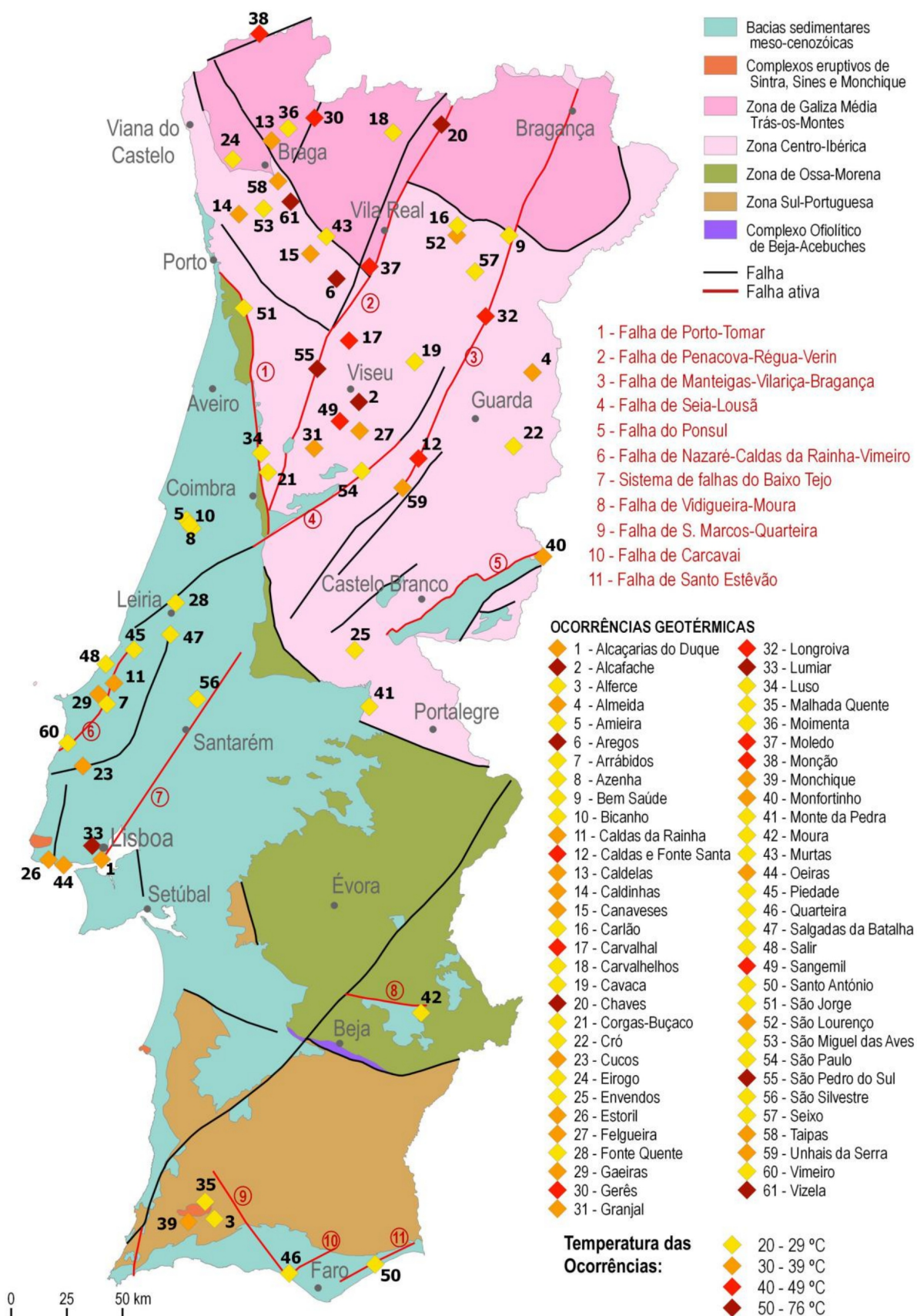


Figura 2.27: Enquadramento tecno-estratigráfico das ocorrências geotérmicas e principais estruturas ativas em Portugal Continental [1]

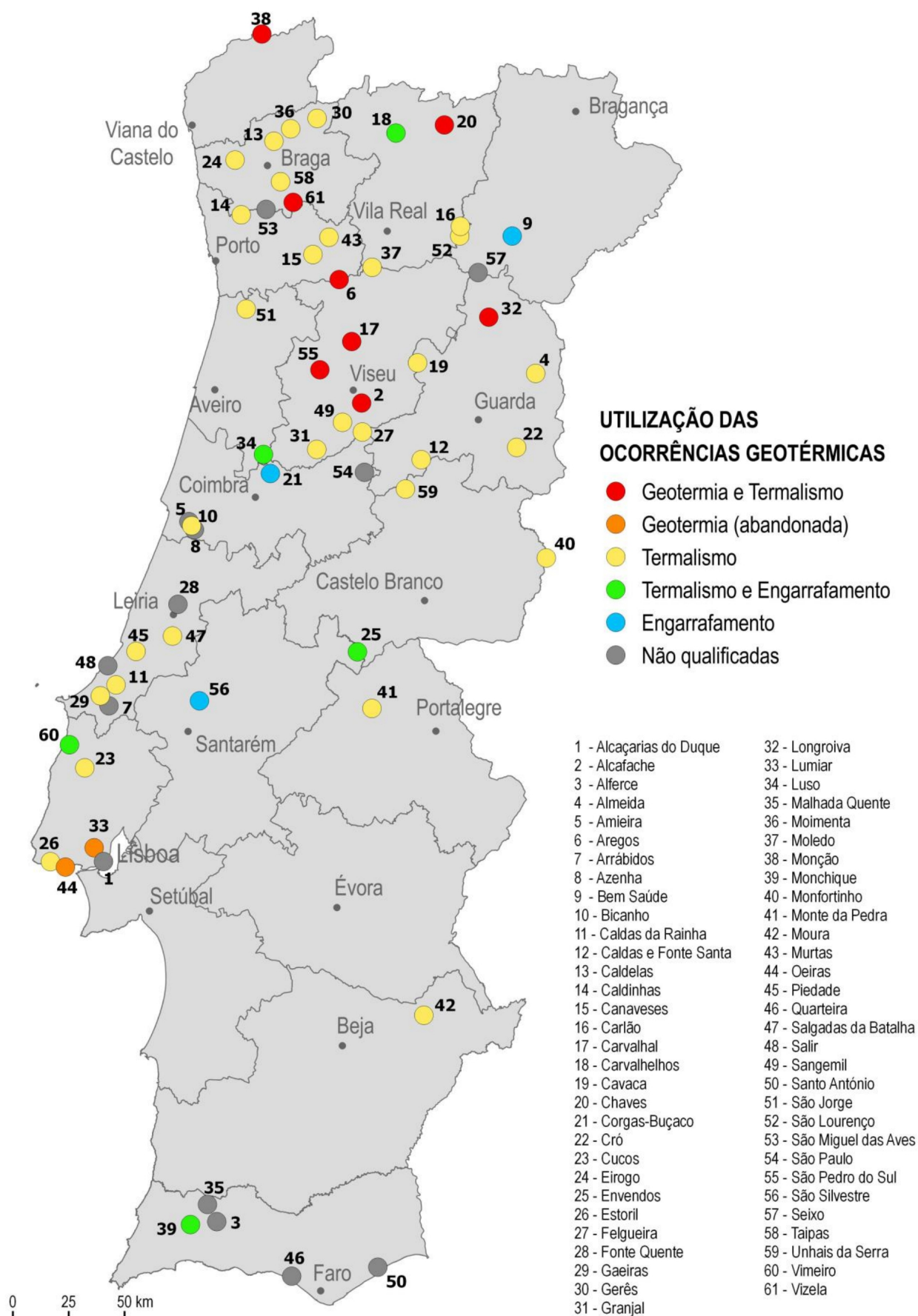


Figura 2.28: Aplicações nas ocorrências geotérmicas em Portugal Continental [1]

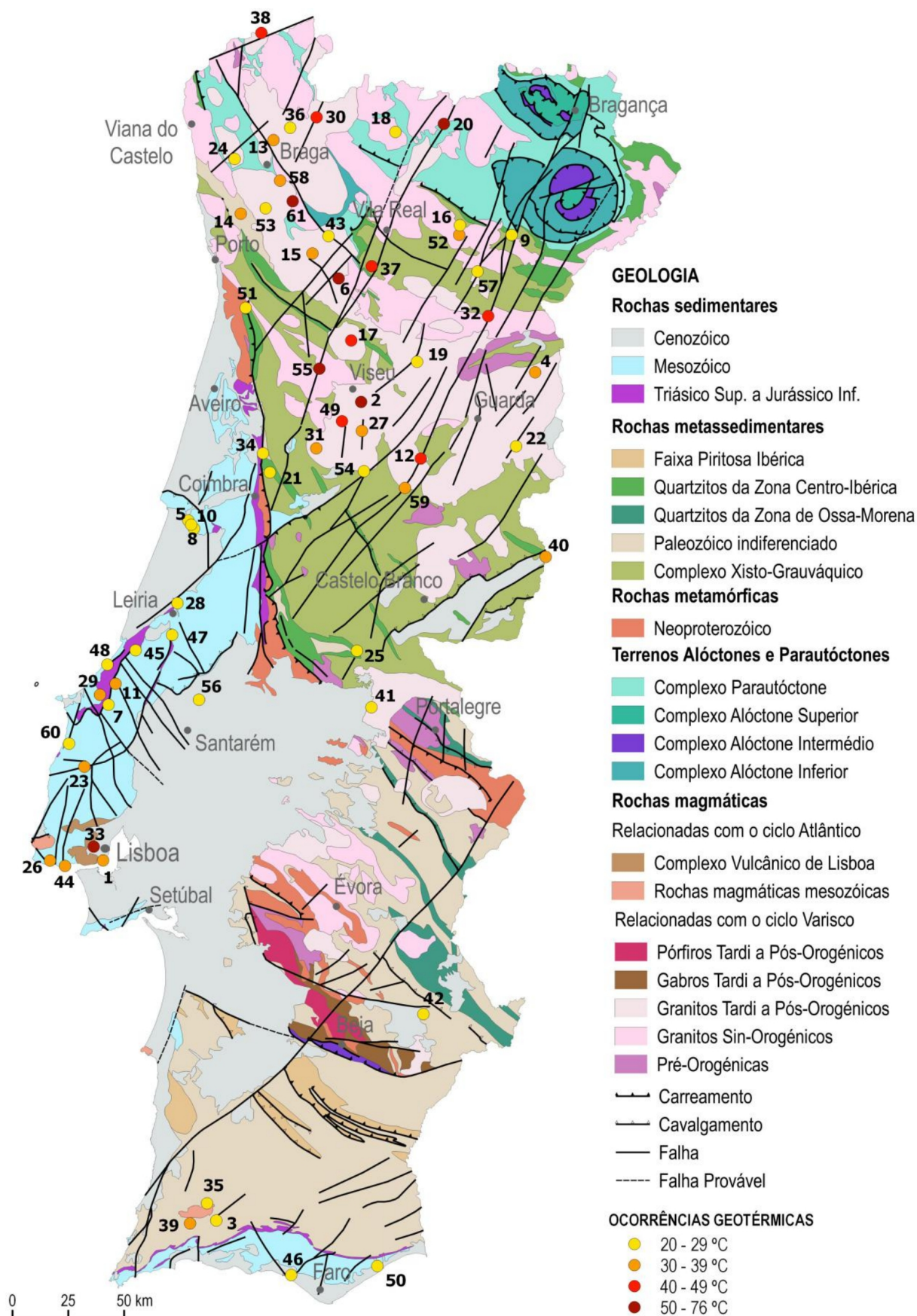


Figura 2.29: Carta geológica das ocorrências geotérmicas em Portugal Continental, retirado de [1], legenda das ocorrências presente na figura 2.27.

2.7 Aplicação Prática

Os principais obstáculos à implementação desta tecnologia estão normalmente associados à falta de conhecimento e consciencialização por parte dos utilizadores e projetistas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) e ao elevado investimento inicial para implementação. Para além disso, existem limitações a nível de infraestruturas e disponibilidade de projetistas e instaladores devidamente experientes e qualificados.



Figura 2.30: Esquema de promoção do aproveitamento dos recursos geotérmicos, retirado de [1]

A tabela 2.3 apresenta a capacidade e o número de bombas de calor geotérmicas registadas a 31 de dezembro no ano de 2014. De acordo com [49], não há registos de outras informações que poderão ser benéficas a uma melhor interpretação tais como a localização, o tipo de bomba, a temperatura do fluido de transferencia de calor para o solo ou o COP. A tabela 2.4

Tabela 2.3: Bombas de calor geotérmicas registadas a 31 de dezembro de 2014 [49].

Capacidade da bomba	Numero de unidades
$\leq 25\text{kW}$	8
25kW - 50kW	4
50kW - 100kW	1

Em Portugal Continental, a exploração e aproveitamento geotérmicos manteve-se estável durante o período 2010-2015. As principais fontes geotérmicas estão localizadas nas proximidades de spas existentes no que diz respeito a uso direto. No que concerne a GSHP o potencial é enorme mas ainda não explorado devidamente [49].

Um exemplo de uma instalação de GSHP pode ser encontrada na instalação da Escola Superior de Tecnologia de Setúbal. Aqui é possível encontrar duas bombas de calor geotérmicas, de potências 15kWt para aquecimento e 12kWt para arrefecimento. É realizada a climatização de 7 salas de escritório e 2 salas de aulas com áreas aproximadas de 15 m² e 54 m², respetivamente. A instalação apresenta COP de aquecimento e arrefecimento respectivamente de 5,19 e 6,05 [49].

Tabela 2.4: Listagem de instalações geotérmicas de uso direto registadas a 31 de dezembro de 2014 [49].

Localização	Aplicação	Condição limite máxima			Capacidade (MWt)	Anual		
		Fluxo (kg/s)	Temperatura [°C]			Fluxo Médio (kg/s)	Energia (TJ/ano)	Fator Capacidade
			Entrada	Saída				
Monção	B+D	12.5	49	20	1.52	8	30.6	0.64
Chaves	B+D	15	74	20	3.39	10	71.2	0.66
Caldelas	B	7.5	30.3	20	0.32	4.5	6.1	0.6
Gerês	B	0.9	47	20	0.1	0.8	2.8	0.88
Taipas	B	2	29	20	0.08	2	2.4	0.99
Caldas da Saúde	B	4	30	20	0.17	3	4	0.75
Carlão	B	0.4	27.5	20	0.01	0.37	0.4	0.99
Aregos	B	4	63	20	0.72	4	22.7	0.99
Carvalhal	B	6.9	60	20	1.15	0.3	1.6	0.04
Cavaca	B	5	29	20	0.19	1	1.2	0.2
São Pedro do Sul	B+D+G	19.4	67	20	3.81	15.4	95.5	0.79
Alcafache	B+D	6	51	20	0.78	4	16.4	0.66
Sangemil	B	6.5	40	20	0.54	4	10.6	0.61
Felgueira	B	9.2	36	20	0.62	4	8.4	0.43
Luso	B	10.5	24.9	20	0.22	2	1.3	0.19
Manteigas	B	4	47	20	0.45	3	10.7	0.75
Unhais da Serra	B	7.2	37	20	0.51	5	11.2	0.69
Monfortinho	B	36	31	20	1.66	4	5.8	0.11
Vimeiro	B	29	24.5	20	0.55	2	1.2	0.07
Monchique	B	10.4	32	20	0.52	3	4.7	0.29
Longroiva	B+D	6.3	47	20	0.71	2.5	8.9	0.39
Açores								
Caldeiras Rib. Grande	B	1	90	20	0.29	1	9.2	0.99
Carapacho (Graciosa)	B	2.5	37.6	20	0.18	2.5	5.8	0.99
Ferraria (S. Miguel)	B	10	62.1	20	1.76	10	55.5	0.99
TOTAL					20.2		388.2	0.5
B-balneoterapia e águas quentes; D-rede de aquecimento urbano; G – estufas								

B-balneoterapia e águas quentes; D-rede de aquecimento urbano; G – estufas

Poderão ser encontrados mais dois exemplos de instalações tais como a instalação GROUND-MED em Coimbra e o polo de empreendedorismo e inovação em Sines. A primeira instalação apresenta uma bomba de calor geotérmica cujas potências térmicas de aquecimento e arrefecimento são respetivamente 65kW e 61kW. Neste caso a performance real é superior ao indicado e a sua aplicação serve para climatização. O permutador de calor terrestre é composto por 7 perfurações no solo de 125m como tipologia U duplo.

No caso em Sines foram instaladas quatro bombas de calor geotérmica para climatização e AQS, duas em edifícios diferentes e duas para um mesmo. A capacidade térmica da bomba de calor geotérmica é de 24.5kW para aquecimento e 18.4 kW para arrefecimento com três perfurações no solo de 150m com tipologia U simples, no caso da máxima instalação individual. No caso da instalação dupla é obtido um agregado de 76kWt para aquecimento e 115.5kWt em ligação com dez perfurações no solo de 150m e tipologia U simples.

2.7.1 Avaliação de recursos, instalação e legislação aplicável

A realização de uma instalação geotérmica obriga a um planeamento detalhado e depende de vários fatores, nomeadamente fatores de índole física do solo, enquadramentos sociais e económi-

cos e por fim burocráticos ou legislativos. Ou seja, poderá ter de comportar diversos fatores desde o início até à possibilidade de operação tais como

- as condições geológicas, hidrogeológicas e geotérmicas locais;
- a viabilidade económica, social e ambiental das acções previstas;
- enquadramentos institucionais e regulamentares;
- acesso a financiamento [1].

Relativamente ao estudo da recolha e avaliação de dados é possível verificar a legislação presente da Lei nº54/2015 de 22 de junho. No caso da necessidade de um contrato de prospeção e pesquisa um conjunto de direitos e deveres deverão estar presentes nas atividades decorridas. Na fase final do estudo prévio, após a obtenção de um conjunto de dados prévios preliminares é tomada a decisão de avançar para a fase que se segue no projeto, ou seja, prospeção e pesquisa. Nesta fase irão ser caracterizadas formações e estruturas geológicas que condicionem o recurso e avaliar e quantificar a disponibilidade geotérmica. Após a execução de todos os trabalhos da fase anterior anteriores, poderá ser discutida então a viabilidade da exploração [1].

Por forma a elaborar um projeto de aproveitamento de recursos geotérmicos será necessário examinar os seguintes parâmetros no que diz respeito a aspetos técnicos e práticos, normalmente associado a um trabalho de dimensionamento de estruturas e avaliação de recursos [1]:

- Temperatura do recurso
- Caudal do fluido
- Profundidade de aproveitamento
- Parâmetros geológicos da reserva
- Quimismo
- Custo das sondagens e instalações
- Distância entre captação e local de aplicação
- Temperatura ambiente do local de aplicação
- Densidade populacional
- Custo de outras soluções energéticas para a mesma finalidade
- Potência calorífica necessária
- Sensibilização dos utilizadores e outras entidades influentes no processo [1].

2.8 Sustentabilidade e Concepções Sociais

No fim de década em que agora nos encontramos a proteção ambiental e social, relativamente ao impacto de novos investimentos no setor energético, tem cada vez maior peso em tomadas de decisão. Desta forma, é possível verificar que até mesmo instituições financeiras têm vindo a dar orientações para uma mudança. O Banco Mundial dá como referência a produção de energia elétrica por via geotérmica.

A geotermia apresenta baixo impacto ambiental negativo e oferece elevada segurança levando a que o ambiente natural envolvente seja mantido bem como a integridade das comunidades e ecossistemas anexos levando então a um desenvolvimento social e económico [1].

A sua elevada disponibilidade e potencial de aplicação, aliado ao facto de apresentar baixas emissões de carbono revela-se uma possibilidade para juntar ao um lote de medidas por forma a combater as alterações climáticas. Neste caso deverá ser tido em conta a sua elevada disponibilidade tendo em consideração todas as aplicações presentes na figura 2.2.

A compreensão da tecnologia geotérmica por parte da população está intimamente relacionada com a fase de maturidade em que esta se encontra. Exemplos podem ser encontrados na exploração geotérmica em S. Miguel (Açores) e nas Termas de Chaves e S. Pedro do Sul [1].

De acordo com [50], as condições associadas à produção agrícola, pesca e pecuária podem ser melhoradas através da provisão de melhor acesso à água em épocas de seca, reduzindo a dependência da ajuda alimentar. Em áreas remotas, longe da rede elétrica, as aldeias e instalações, como hospitais, possivelmente poderiam substituir os sistemas de climatização por bombas de calor geotérmicas diminuindo a os requisitos das redes elétricas como consumo de combustíveis fósseis.

2.9 Enquadramento de mercado

Um grande número de fatores técnicos e económicos podem ser importantes na adoção da tecnologia de GSHP e particularmente nos estágios iniciais do crescimento da indústria de instalação nacional. Os fatores técnicos que podem favorecer os sistemas de GSHP resultam da sua eficiência termodinâmica fundamentalmente favorável e isso é um fator significativo em climas mais frios. Em locais onde as propriedades não têm acesso a nenhuma rede de gás natural, qualquer tipo de bomba de calor pode ser uma opção atraente. Nestas situações, uma bomba de calor de fonte de ar pode ser uma das opções mais económicas. No entanto, as dificuldades com o congelamento de permutadores de calor externos e a queda de capacidade em temperaturas externas muito baixas, no caso de bombas de calor de fonte de ar, podem significar que GSHP é a melhor solução técnica. A tecnologia GSHP também tem alguma vantagem, pois a instalação final é discreta e silenciosa quando comparada às soluções de ar-condicionado ou convencional [19].

Quaisquer fatores técnicos prejudiciais associados à perfuração, aos permutadores de calor, materiais e equipamento das bombas de calor são geralmente problemas mínimos com fontes de alimentação monofásicas limitadas, sendo uma possível exceção em alguns países. Em locais

específicos, pode haver dificuldades ou incertezas com perfurações, mas uma variedade de técnicas de perfuração estão definidas para lidar com a maioria das condições geológicas [19].

Os custos de perfuração e permutadores de calor terrestres devem ser cobertos além do custo do equipamento da bomba de calor designada para o projeto. Consequentemente, nos locais onde a concorrência é de sistemas de aquecimento movidos a combustíveis fósseis (e combinações de combustível fóssil e ar arrefecido por *chillers* em aplicações não residenciais), os sistemas GSHP podem ser pouco atraentes para os projetistas devido ao aumento da necessidade de capital. Apesar de poder ser demonstrado um menor custo de ciclo de vida, esta comparação continua a ser dependente dos custos de combustível e energia podendo estes mesmos variar significativamente entre países e ao longo do tempo. [19].

De acordo com as conclusões apresentadas sobre os casos de estudo presentes em [51], é possível verificar que os elevados parâmetros de performance apresentados levam a custos operacionais mais baixos e permitem então a recuperação do elevado investimento inicial num curto período de tempo. Caso se venha a verificar a disponibilização de incentivos financeiros e na criação de impostos sobre as emissões de CO₂, os sistemas geotérmicos tornam-se mais atrativos.

Capítulo 3

Metodologia e modelo

A complexidade de um modelo pode ser expressa em termos de alcance (definido pelo número de componentes no modelo), a sua resolução (definida pelo número de estados por componente no modelo) e as respetivas interações entre os componentes. Existe uma certa complexidade de modelação a partir da qual a previsão de incerteza será maior que a incerteza inerente ao programa de simulação [52]. Desta forma foi dada preferência à simplificação do modelo por forma a obter um alto valor de estudo em baixa complexidade para os requeridos objetivos de simulação.

Este capítulo está dividido em seis secções. Na primeira secção 3.1 são indicadas as linhas de raciocínio base que guiam o desenvolvimento do presente trabalho. Na segunda secção 3.2 é apresentada a descrição de software bem como a aproximação inicial aos componentes a serem desenvolvidos e a forma como estes se adequam ao software utilizado. Na terceira secção 3.3 é apresentada a esquematização e modelação do sistema geral em *TRNSYS* onde são identificados os componentes de acordo com a organização e forma de trabalho do software. Na secção 3.4 são apresentadas as características da monozona modelo. Na quinta secção 3.5 são apresentadas as características associadas à bomba de calor geotérmica. Na sexta secção são apresentadas as características associadas ao permutador de calor terrestre. Esta secção apresenta uma subdivisão final associada ao cálculo da resistência térmica do permutador, valor esse essencial ao dimensionamento do permutador de calor terrestre.

3.1 Metodologia do trabalho

No projeto de uma instalação de bomba de calor geotérmica é necessário ter em consideração aspetos chave para a sua elaboração. Um planeamento de base organizado e definido permitirá o desenvolvimento do tema a explorar. A instalação de uma bomba de calor geotérmica terá que levar em consideração a potencia de pico bem como a necessidade energética a fornecer, tanto à carga (edifício) como à fonte (solo). Por forma a facilitar a compreensão deverão estar cimentados os seguintes conceitos base:

- Cargas de pico - Cargas utilizadas para dimensionar e seleccionar a bomba de calor correspondendo ao valor máximo exigido no sistema em situações de aquecimento e arrefecimento

- Necessidade energética - Energia necessária que o sistema deve fornecer ao edifício durante um determinado período de tempo (diário, mensal, anual, etc).
- Carga térmica no solo - Representa a quantidade de calor fornecido pelo solo (em modo aquecimento) ou dissipado pelo mesmo (em modo arrefecimento).

Por forma a dar início ao projeto foi elaborada a monozona modelo e verificadas as cargas mais exigentes ao longo do ano, aquecimento e arrefecimento. A simulação realizada na monozona utilizou as ferramentas presentes no software (*TRNBuild*) por forma a alterar as características presentes na mesma, e no software principal foi realizado o cálculo de todos os componentes envolvidos. Na junção de ambos os softwares foi possível através das opções de infiltração, ventilação, aquecimento, arrefecimento e ganhos internos, avaliar o comportamento do modelo ao longo do ano, caso exista um controlo de temperatura (aquecimento/arrefecimento) ou não. No caso de controlo de temperatura são apenas indicadas as temperaturas mínimas e máximas às quais deverá se encontrar o local, com uma potência térmica ilimitada. Através desta ferramenta é possível obter a carga de pico da monozona e definir a bomba de calor geotérmica a aplicar. Uma vez obtidos os dados presentes no mercado relativamente à bomba de calor geotérmica, foi pré-dimensionado o permutador de calor terrestre e estudado o formato de climatização da monozona. Uma vez concluído todo este processo é possível então obter os dados de avaliação do modelo geral de simulação e analisar o comportamento de todos os componentes. Nomeadamente serão valores tais como temperatura interior da monozona, potência térmica, potência elétrica, COP entre outros.

3.2 Descrição de software - TRNSYS e Modelo Construtivo Base

Atendendo aos dados apresentados na tabela 3.1 e figura 3.1 é possível verificar que existem múltiplos softwares sendo no entanto de realçar programas tais como *EnergyPlus*, *TRNSYS*, *TRACE*, *eQUEST* e *IDA ICE* devido à sua oferta de capacidade de discretização e configuração.

Tabela 3.1: Resumo de programas apropriados à simulação de sistemas/componentes AVAC e sistemas de energias renováveis [53]

PROGRAMAS	BLAST	BSim	DeST	DOE-2.1E	ECOTECT	EnerWin	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	IDA ICE	IES <VE>	HAP	HEED	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Renewable Energy Systems (12 identified, X+O)	1	2	2	1	4	0	0	2	4	2	7	1	3	0	0	1	2	2	0	12
Idealized HVAC systems	X		X		X	X			X		X	X	X				X			X
User-configurable HVAC systems		X	X				P		X		X	X	X	X	X	X	R	X	X	X
Pre-configured systems (among 34 identified, X+O)	14	14	20	16	0	16	5	7	28	24	23	32	28	28	10	8	1	23	26	20
Discrete HVAC components (98 identified, X+O)	51	24	34	39	0	24	8	15	66	61	40	52	38	43	7	15	3	26	63	82

X feature or capability available and in common use; P feature or capability partially implemented; O optional feature or capability; R optional feature or capability for research use; E feature or capability requires domain expertise; I feature or capability with difficult to obtain input.

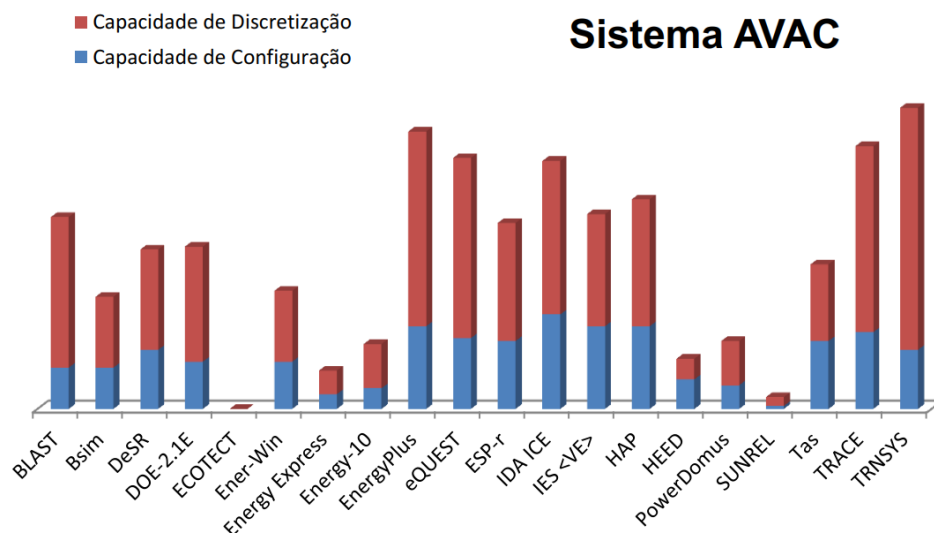


Figura 3.1: Comparação qualitativa entre programas de simulação relativamente à modelação de sistemas AVAC, retirado de [54] com base científica em [53]

Para além disso existem testes comparativos que realizam, tal como o próprio nome indica, a comparação entre o software em avaliação e os demais softwares em estudo. Este tipo de avaliações originam dois tipos de dados diferentes, validação e apuramento de erros.

Os procedimentos da norma *ANSI/ASHRAE Standard 140-2001* tiram proveito do método de teste comparativo e têm a vantagem de, em concordância com os testes específicos da norma, terem sido já realizados ensaios em vários outros programas. Desta forma é possível então avaliar e decidir acerca do software a explorar e também avaliar as condições passíveis de acesso [55].

Por forma a compreender melhor a utilização dos testes comparativos e o seu enquadramento, estes irão ser identificáveis em 3.4. Atendendo às ferramentas disponibilizadas para a realização da dissertação e aos objetivos colocados, foi utilizado o programa *TRNSYS*.

TRNSYS é um programa de simulação de processos térmicos amplamente utilizado. Foi originalmente desenvolvido pelo laboratório de energia solar da Universidade de Wisconsin para aplicações de energia solar, e agora pode ser usado para uma ampla variedade de processos térmicos. A primeira versão foi lançada em 1977.

Atualmente *TRNSYS* é um programa de simulação de sistemas transientes, disponível no mercado corrente, e que está continuamente em desenvolvimento através de colaboração internacional dos Estados Unidos (Especialista sistemas de energia térmica e da Universidade de Wisconsin - *Solar Energy Laboratory*), França (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*) e Alemanha (*TRANSSOLAR Energietechnik*). Este software permanece como uma oferta flexível na simulação de comportamentos energéticos através de várias dinâmicas tais como: facilitando o adicionamento de modelos matemáticos utilizando linguagens de programação correntes (*C, C++, PASCAL, FORTRAN*), componentes pré-elaborados presentes na biblioteca de componentes e a capacidade de interação com outros programas de simulação (*Microsoft Excel, Matlab, COMIS*, etc.).

A sua aplicação tem sido amplamente utilizada para simulações de energia solar, sistemas de energia elétrica, edifícios convencionais e até mesmo processos biológicos [56]. Desde a sua criação que têm a estrutura modular aberta com código aberto [57]. O utilizador final têm a possibilidade de criar componentes personalizados para as suas necessidades de simulação dinâmica, ou poderá optar pela seleção de componentes pré-elaborados presentes na biblioteca disponibilizada. Esta biblioteca poderá comportar componentes pré-elaborados presentes nas mais variadas áreas com interpretação energética, denominados como *TYPE*. As aplicações do software *TRNSYS* incluem:

- Sistemas Solares (térmicos e fotovoltaicos)
- Edifícios e sistemas AVAC
- Sistemas de energia renovável
- Cogeração e combustíveis
- Outras necessidades de simulação dinâmica

Por forma a suavizar a utilização de todas as ferramentas o *TRNSYS* será dividido em 3 programas, nomeadamente:

- *TRNSYS Simulation Studio* - Interpretação do sistema geral através da simulação dos componentes e respetivas ligações, ou seja, o programa principal;
- *TRNBuild* - Introduz as informações necessárias acerca do edifício, componente essa que será referida no programa principal *Type56*;
- *TRNEdit* - Permite a edição dos componentes presentes no software [56].

Na dissertação apresentada foi colocado como o objetivo a modelação de uma bomba de calor geotérmica e aplicá-la numa monozona tipo calculando posteriormente o seu desempenho energético. Uma vez que o tema da energia geotérmica apresenta reduzida penetração no mercado comparativamente com outras tecnologias energéticas, tais como a energia fotovoltaica e a eólica, foi colocado como objetivo a utilização de um software que permita tanto uma modelação simples como forma inicial de abordagem ao tema como também uma complexificação do mesmo após aproximações iniciais. Ou seja, alterar eficazmente a monozona em avaliação, localizar o empreendimento em diferentes locais, aceder a diferentes sistemas de climatização, alterar as características da bomba e do permutador de calor, realizar a colocação de um depósito de inércia e também a adição eventual de sistemas anexos de fonte renovável, como painéis fotovoltaicos ou coletores solares a título de exemplo.

Assim sendo será possível modelar uma casa modelo com várias zonas, com especificações individuais quanto às respetivas cargas térmicas, infiltrações, coeficientes de transmissão de calor entre as diferentes zonas de acordo com as limitações adjacentes.

No que concerne à localização da monozona, será então possível no mínimo referenciar locais de referencia nacionais e que sejam relevantes para o estudo.

Relativamente à bomba de calor geotérmica será possível utilizar bombas de calor ar-água e água-água tanto monofásico como trifásico. Para além disso, acedendo aos dados de performance da mesma é possível utilizar em simulação um bomba de calor específica presente no mercado.

O permutador de calor terrestre presente no *software* irá permitir uma simulação tanto de um permutador de calor horizontal como vertical. Relativamente ao permutador vertical a possibilidade de configuração do tipo de tubo será tubos concêntricos ou formato U [58]. A figura 3.2 apresenta um esquema do tipo de configuração tubular vertical referido anteriormente.

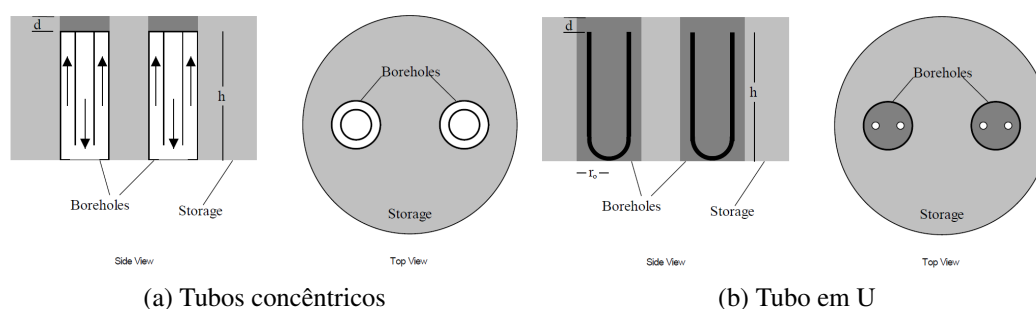


Figura 3.2: Tipo de configuração tubular vertical [58]

3.3 Modelação e esquematização em *TRNSYS*

O objetivo da simulação passa por elaborar um controlo da temperatura interna da monozona através de ar condicionado. Uma vez que a bomba de calor aplicada utiliza dois fluidos (água-água) e não ar, será então necessário recorrer a um permutador de calor que realize a transferência de energia da água para o ar que virá do exterior. Por forma a simplificar a compreensão de todo o sistema foi realizada uma divisão de todo o modelo presente no TRNSYS uma vez que a quantidade de componentes e as respectivas ligações não beneficiam uma benéfica compreensão. Uma vez tomada esta opção é possível observar um esquema com os componentes gerais onde existe a passagem e alteração das condições dos fluidos de trabalho, figura 3.3, e um esquema onde estão presentes os componentes de controlo aplicados no sistema, figura 3.4. Por forma a realizar a associação entre ambos deverão ser observados os componentes presentes em ambos os esquemas. Os componentes referentes à observação e escrita de resultados não foram colocados em imagem dada a complexidade adjacente de esquematização e o seu baixo relevo para a compreensão do sistema.

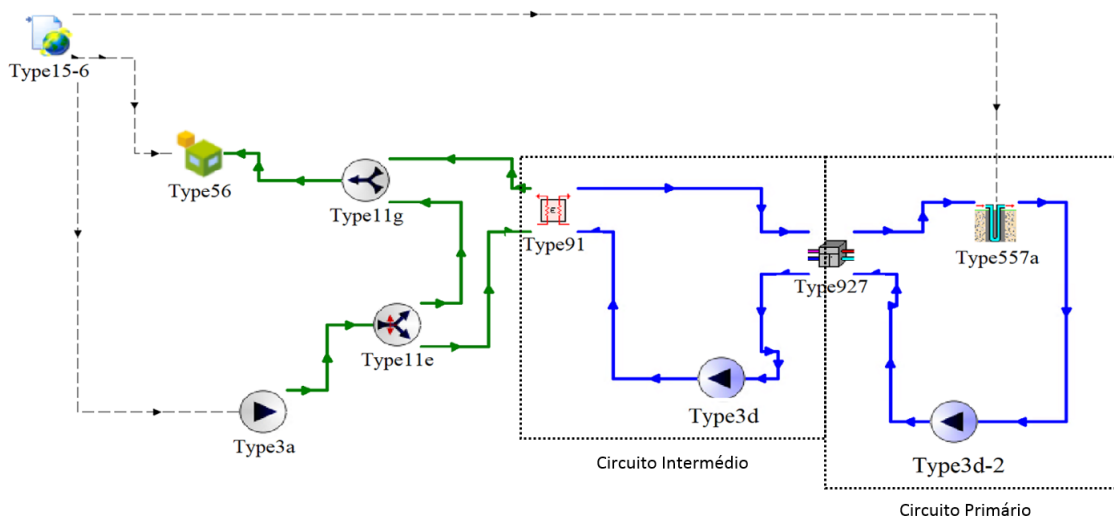


Figura 3.3: Esquema geral em TRNSYS de funcionamento do sistema

Os componentes evidenciados na figura 3.3 serão descritos da seguinte forma:

- *TYPE 15-6* corresponde ao componente de modelação que irá inserir os dados referentes ao comportamento meteorológico no Porto, nomeadamente utilizando os dados fornecidos por *Meteonorm*;
- *TYPE 56* corresponde à entrada de dados relativamente à monozona pré elaborada, presente em 3.4;
- *TYPE 11g* corresponde à junção de fluido que vem do permutador de calor (*TYPE91*) e do ar exterior;
- *TYPE 11e* corresponde ao divisor que irá condicionar a quantidade de fluido que vai para o permutador de calor ou que segue sem transferência de energia perante o sistema;
- *TYPE 3a* corresponde ao ventilador de fluxo variável que aproveita o ar exterior para ser aquecido ou arrefecido e que será encaminhado para o interior da monozona;
- *TYPE 91* corresponde ao permutador de calor que realiza a transferência de energia entre o ar e a água vinda da zona de carga da bomba de calor;
- *TYPE 3d* corresponde à bomba de circulação de fluido que define o fluxo no circuito intermédio;
- *TYPE 927* corresponde à bomba de calor água água, em inglês *Water-Water Heat Pump* (WWHP), presente em 3.5;
- *TYPE 3d-2* corresponde à bomba de circulação de fluido que define o fluxo no circuito primário;

- *TYPE 557a* corresponde ao permutador de calor terrestre vertical, presente em 3.6.

As bombas de circulação aplicadas, tanto a bomba *Type 3d* como a bomba *Type 3d-2* irão impor uma fluxo de circulação de 1136 kg/h. Este fluxo de circulação corresponde ao fluxo de optimização da bomba de calor geotérmica de acordo com o catálogo presente no anexo B.

O permutador de calor presente no componente *TYPE 91* corresponde a um permutador de calor com eficiência constante. A eficiência constante irá corresponder ao quociente entre a quantidade de energia transferida e o valor máximo que poderia ser transferido. O valor atribuído para a eficiência foi de 0,8.

Os componentes intermédios, nomeadamente bombas, divisor, e bomba de calor geotérmica, irão necessitar de um sistema de controlo por forma a cumprir os requisitos de funcionamento da monozona.

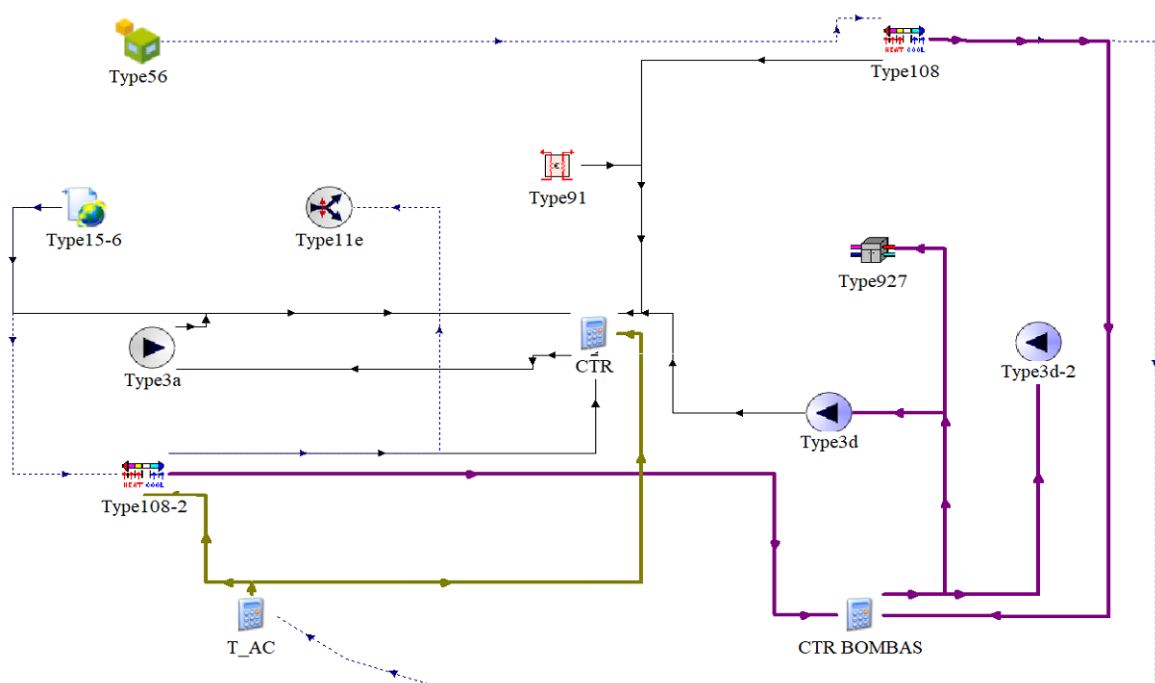


Figura 3.4: Esquema geral em *TRNSYS* do sistema de controlo

Os componentes evidenciados na figura 3.4 serão descritos da seguinte forma:

- *TYPE 108* corresponde ao termostato que avalia a temperatura no interior da monozona
- *CTR BOMBAS* corresponde ao componente de controlo direto das bombas de circulação
- *CTR* corresponde ao componente de controlo do ventilador e definição da quantidade de fluxo a inserir proveniente do exterior
- *T AC* corresponde ao controlador que irá indicar quais as temperaturas finais que deverão ser aplicadas na monozona por parte do sistema de climatização

- *TYPE 108-2* corresponde ao termostato que avalia a temperatura externa

O termostato *TYPE 108* deverá dar a indicação de que será necessário acionar o sistema de climatização da monozona. Para isso enviará sinal às bombas de circulação e ao componente de controlo das temperaturas de funcionamento da entrada de ar aquecido/arrefecido. Por forma a ser cumprido o regulamento referente as características de comportamento térmico de edifícios no que se refere às temperaturas de conforto internas (RCCTE) [59], a temperatura indicada para iniciar aquecimento e arrefecimento foi alterada respetivamente para 20 e 25 °C.

Para este ser preenchido, os parâmetros deste componente foram introduzidos de acordo com a tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros de definição dos termostatos *TYPE108* e *TYPE108-2* em *TRNSYS*

Temperatura [°C]		Oscilações entre intervalo de simulação	Intervalo de histerese
Aquecimento	Arrefecimento		
21	24	5	2

CONTROLO DO SISTEMA

O termostato *TYPE 108-2* deverá dar a indicação da necessidade de ativação do sistema de aquecimento/arrefecimento consoante a temperatura exterior, tanto ao controlador das bombas de circulação como ao controlador CTR e também ao divisor de fluxo. Caso a temperatura exterior esteja de acordo com a temperatura pretendida no fluxo de entrada na monozona, será desligado o sistema de aquecimento/arrefecimento. No entanto é dado o sinal de necessidade de controlo da temperatura interna do edifício de teste.

O controlador CTR BOMBAS irá realizar a associação de sinal entre a necessidade de climatização da monozona e a necessidade de funcionamento das bombas dada a temperatura externa. No caso de a temperatura exterior for igual à temperatura definida para a entrada de ar na monozona, não será necessário então a ativação do sistema de aquecimento/arrefecimento do fluido.

O controlador CTR deverá realizar o calculo da quantidade de fluxo de ar necessário por forma a atingir a temperatura desejada para a entrada de ar na monozona. As condições do ar vindo do exterior deverão ser tidas em conta. Por forma a ser avaliada a quantidade de fluxo necessária a atingir determinada temperatura, foram aplicados os conhecimentos de termodinâmica. Por forma a simplificar o problema e tendo em conta os dados fornecidos pelo software, foi aplicada a equação da conservação da energia. A equação utilizada para o calculo do fluxo de ar a enviar pelo permutador de calor encontra-se na equação 3.1.

$$\dot{m}_{ar} = \xi \frac{\dot{m}_{ag} c_{p_{ag}} (T_{ag_e} - T_{ag_s})}{c_{p_{ar}} (T_{AC} - T_{ar_e})} \quad (3.1)$$

Sendo que: \dot{m}_{ag} corresponde ao fluxo mássico; $c_{p_{ag}}$ corresponde ao calor específico água a 20 °C; $c_{p_{ar}}$ corresponde ao calor específico ar seco a 20 °C; T_{ag_e} corresponde à temperatura da água na entrada do permutador de calor; T_{ag_s} corresponde à temperatura da água à saída do permutador de calor; T_{AC} corresponde à temperatura do ar à saída do permutador de calor; T_{ar_e} corresponde à temperatura do ar à entrada do permutador de calor; ξ corresponde à eficiência do permutador.

Devido a questões de histerese, os valores aceitáveis tanto na diferença de temperatura para o ar como para a diferença de temperatura da água, deverão ser controlados. O sinal enviado para o ventilador deverá ter em conta o fluxo padrão definido e permitir então utilizar apenas uma fração da capacidade máxima do mesmo.

O controlador T AC deverá indicar quais os valores alvo para a temperatura à saída do permutador. Neste projeto foi aplicada a temperatura de 20 °C em situações de arrefecimento e 25 °C em situações de aquecimento. Desta forma será mais rapidamente atingida a temperatura de conforto no edifício de teste e não existiram implicações relativamente a desconforto na entrada de ar na monozona modelo.

3.4 Monozona modelo

Ao seleccionar uma estrutura base é possível então providenciar um sistema normalizado no qual é permitido obter melhor informação concretizada, estudos comparativos e validação de dados. Desta forma poderá ser facilitado e agilizado tanto o trabalho explorado neste documento como o processo de incursão em novos projetos, modelos ou variações do mesmo. A partilha e acesso também poderão sair beneficiados. Por conseguinte foi realizada a consulta do relatório técnico *EnergyPlus Testing with ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (BESTEST)* [55] e adoptadas as indicações presentes passíveis de serem aplicadas no programa definido para simulação. A figura 3.5 representa a monozona modelo utilizada neste trabalho.

O modelo de monozona base seleccionado foi o *Case 600 - Base Case Low Mass Building*. Este modelo apresenta o caso de menor incidência em climatização passiva e a maior simplificação de modelação, sendo então essa uma das principais razões para a seleção do modelo uma vez que coloca a dependência do sistema e consequente foco de análise no sistema de climatização ativa desenvolvido. Também será necessário referir que este modelo base apresenta a maior necessidade energética relativamente ao seu homólogo *Case 900 - Base Case High Mass Building* devido ao seu menor isolamento térmico tendo em vista a variação de espessura que diferencia os dois casos.

A monozona presente na figura 3.5 é uma monozona retangular com as seguintes dimensões: 8 m de largura, 6 m de comprimento e 2,7 m de altura sem nenhuma parede interior e com janelas expostas a sul numa área de 12 m². As propriedades específicas construtivas do modelo encontram-se referidas no anexo A. As características gerais finais dos elementos de construção encontram-se indicadas na tabela 3.3

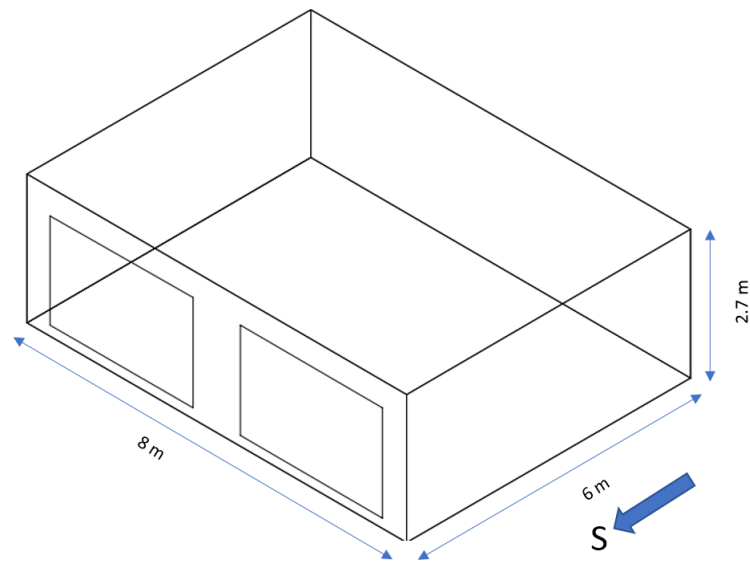


Figura 3.5: Edifício Base (*Case 600*) - Vista isométrica do canto com janela na parede Sul sudeste [55].

Tabela 3.3: Características gerais dos elementos de construção da monozona

Propriedade	Paredes Exteriores	Chão	Teto	
e	0.087	0.025	0.141	m
U	0.510	0.039	0.316	W/m ² K
α_{abs}		0.6		
(Interior e Exterior)				

Sendo que e corresponde à espessura, U corresponde à transmissão térmica e α_{abs} corresponde à absorvência.

Todas as características indicadas no documento foram passíveis de serem reproduzidas excetuando a indicação referente às janelas presentes na fachada Sul. As indicações presentes em [55] e também no anexo A referente às janelas, não se apresentam moldadas para inserção no programa definido. Por conseguinte foram ensaiadas todas as janelas tipo presentes no programa sem que nenhuma apresentasse resultados satisfatórios. Por forma a dar continuidade ao projeto, o modelo de janela aplicado ao edifício corresponde ao INS2_KR_3 cujas características se encontram definidas na tabela 3.4. Este modelo encontra-se presente na biblioteca de modelos pré-elaborados, disponibilizado pelo *software* TRNSYS.

Tabela 3.4: Principais características da janela alternativa ao modelo base

Insulating Kr 1.1		
WinID	2003	
Isolamento	Krypton	
U	0.86	W/m ² K
g	0.598	
T_{sol}	0.426	
$R_{f sol}$	0.266	
T_{vis}	0.706	

Os valores apresentados na tabela 3.4 são referentes às seguintes características, onde:

- g corresponde ao fator solar;
- T_{sol} corresponde à transmitância solar;
- $R_{f sol}$ corresponde à reflectância solar na face exterior;
- T_{vis} corresponde à transmitância visível.

A figura 3.6 apresenta um exemplo de uma interface de configuração, sendo neste caso referente a uma parte da configuração da monozona.

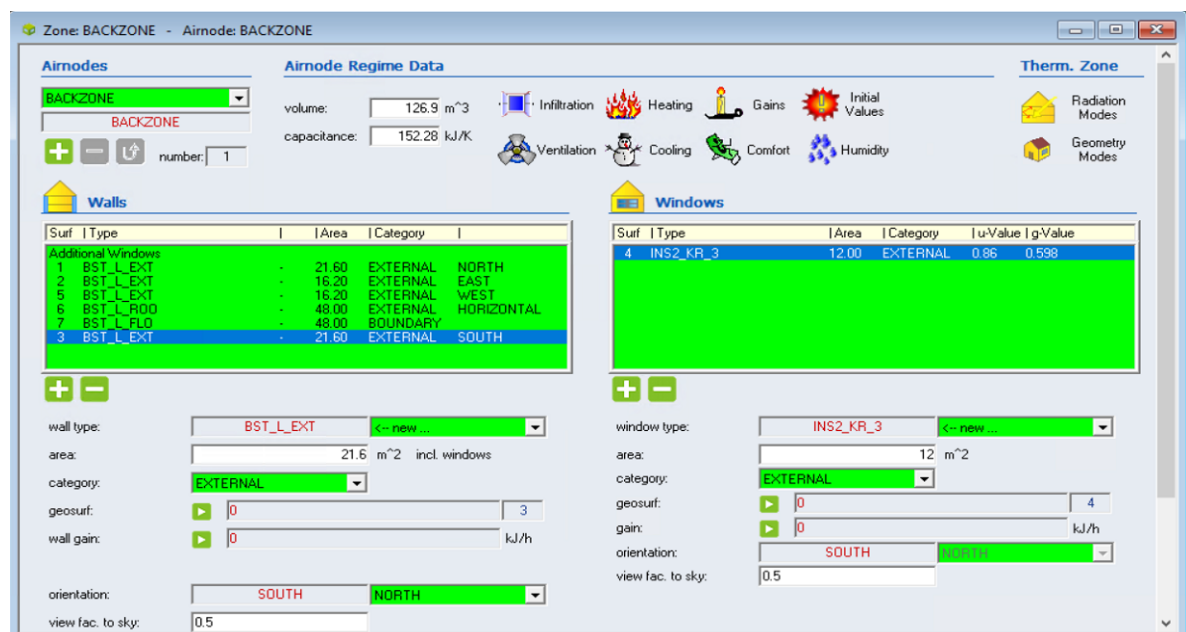


Figura 3.6: Interface de configuração da monozona

Com as características previamente definidas relativamente aos seus elementos constituintes foi então possível realizar uma avaliação das necessidades energéticas e consequentemente a avaliação do modelo de bomba de calor a aplicar. A localização a aplicar neste caso foi o Porto, utilizando os dados presentes no *TYPE 15-6*.

3.5 Modelação da bomba de calor geotérmica

Por forma a realizar a modelação da bomba de calor geotérmica recorreu-se a um elemento de modelação pré-existente no software e à sua possibilidade de inserção de perfis de modelação de bomba. O elemento seleccionado foi o *TYPE 927* presente na Library(TESS), conteúdo adicional não presente no programa de base disponibilizado pelo *TRNSYS*. Esta biblioteca digital adicionada foi criada pela empresa *Thermal Energy System Specialists* por forma a aumentar as possibilidades de modelação em software *TRNSYS*, nomeadamente com uma secção direccionada exclusivamente a *Geothermal Heat Pump (GHP)*, ou seja, sistemas aplicados a bombas de calor geotérmicas. Caso contrário não será expectável modelar o sistema de acordo com a data de execução da dissertação.

Nesta secção é possível encontrar não só permutadores de calor terrestres horizontais e verticais bem como variações de tubulação aplicada no interior do permutador de calor. Deverá então ser referido que esta secção apresenta componentes de modelação para:

- Tubulação enterrada para transporte de fluido
- *Ground Heat Exchangers (GHE)* - Permutadores de calor terrestres - Verticais e Horizontais
- *Water Source Heat Pump (WSHP)* - Bomba de calor cuja fonte será um circuito de água com a opção de utilização de um recuperador de calor.
- *WWHP* - Bomba de calor água-água, cujo formato de funcionamento será utilizando um fluido tanto na fonte como na carga.

Segundo [58] o componente *WSHP* encontra-se designado como indicado para aplicações residuais. Permite a conexão com modelos de depósito de inércia e a ar como fluido de carga. Após uma extensa pesquisa das bombas disponíveis no mercado e dos catálogos apresentados não foi possível utilizar um modelo adequado à simulação (*WSHP*) que fornecesse os dados necessários para a sua simulação. Por outro lado, algumas marcas providenciaram documentação anexa relativamente a bombas de calor *WWHP* que permite a sua aplicação no software. O último modelo referenciado, *WWHP*, e o modelo referente a *GHE Vertical* irão ser então os modelos a utilizar na metodologia de exploração do tema central.

Por forma a modelar uma bomba de calor geotérmica presente no mercado será necessário fornecer ao programa dois quadros de informação. A saber deverá ser indicada a informação de parametrização geral num primeiro quadro e, num segundo quadro, dois ficheiros auxiliares com a informação relativa aos dados de performance de aquecimento e arrefecimento, separadamente.

A informação instrutiva de base não se apresenta completa relativamente a este componente de modelação. É então necessário recorrer várias vezes a uma interpretação de tentativa e erro.

Desta forma será possível interpretar a ferramenta disponibilizada e realizar uma verificação de dados por forma a validar a sua utilização.

No ficheiro de suporte foi possível obter os dados transformados referentes à bomba modelo utilizada, a notar então como sendo a marca e modelo - *TRANE*[®] *WPWD 024*. Através do manual presente em [60] foi possível interpretar as informações presentes nos ficheiros auxiliares a modificar. A verificação de dados foi realizada por forma a confirmar a veracidade do simulador. Um exemplo da variação de resultados entre os valores de catálogo e os valores de saída do componente de simulação encontram-se na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Exemplo de variação de resultados para o modelo TRANE WPWD 024 entre o TYPE927 e valores de catálogo

\dot{V} - 4 GPM T[°C]					
Modo	T _{fonte}	T _{carga}	$P_h/P_c\%$	$P_e\%$	COP/EER _%
HEATING	10	15.55	0	0	0
COOLING	-1.11	32.22	0	0	0

Onde:

- T corresponde à temperatura em [°C];
- P_e corresponde à potência elétrica;
- P corresponde à potência térmica;
- h corresponde ao indicativo de aquecimento;
- c corresponde ao indicativo de arrefecimento.

A apresentação da indicação da eficiência da bomba de calor geotérmica apresenta duas definições, nomeadamente o COP e o *Energy Efficiency Rating* (EER). O valor do COP corresponde à relação entre a energia térmica fornecida por um sistema e a energia elétrica consumida pelo sistema para fornecer essa mesma quantidade de energia térmica. Normalmente aplicado tanto em aquecimento como arrefecimento, sendo que deverá ter a indicação de qual o modo aplicado. O valor do EER corresponde ao índice de eficiência energética. Este valor é obtido, em determinados testes específicos, através da relação entre a capacidade de refrigeração de um sistema, em Btu/h, e a energia elétrica total em W. Quanto maior for o valor, tanto do COP como do EER, maior será a eficiência do equipamento [61].

A definição de fonte estará relacionada com a parte do sistema da bomba de calor geotérmica que realiza a transferência de calor com o edifício e a definição de carga está relacionada com a

parte do sistema da bomba de geotérmica que realiza transferência de calor com o permutador de calor terrestre.

Os dados necessários a apresentar em ficheiro auxiliar correspondem a:

- Caudal - Fonte e Carga
- Temperatura Entrada - Fonte e Carga ($^{\circ}\text{C}$)
- Potência Térmica de Aquecimento/Arrefecimento
- Potência elétrica

Os dados referentes a caudal, capacidade térmica e potência deverão ser introduzidos no ficheiro de suporte como o quociente entre os valores de performance indicados no catalogo e o valor introduzido como o de normalização da bomba no primeiro quadro, tanto relativamente às potências térmica e elétrica como ao caudal. As temperaturas que constam nos ficheiros em anexo deverão ser as temperaturas indicadas no catálogo mais a temperatura de interpolação, caso seja necessário. Esta metodologia deverá ser aplicada tanto ao caso de aquecimento como de arrefecimento. Assim sendo deverá ser facultado ao *TYPE 927*, em ficheiros anexos devidamente organizados, os valores em quociente da potência térmica e potência elétrica para cada combinação de temperatura e caudal normalizados.

A bomba de mercado selecionada foi o modelo *5 series NSW018* da Waterfurnace[®], selecção essa baseada no resultado das potências térmicas de pico que foram calculadas para a monozona e que se encontram presentes na tabela 4.2. Esta tabela encontra-se no capítulo 4, referente aos resultados. Esta bomba apresentou, de acordo com a pesquisa realizada, a bomba de mercado com a menor potência normalizada e com o formato de informação de catalogo relativamente à sua performance mais adequado à simulação em *TRNSYS*. Os dados extensivos relativamente a este modelo encontram-se no anexo B. Os dados principais relativamente ao modelo seleccionado encontram-se na tabela 3.6. Os dados indicados estão de acordo com a tabela geral de performance.

Tabela 3.6: Dados principais do modelo *5 series NSW018*

Modo	Potência Térmica [kW]	COP/EER	Regulação
Aquecimento	4.31	3.1	ON-OFF
Arrefecimento	5.07	4.87	

Os caudais presentes no anexo B encontram-se abaixo do número necessário ao processamento de dados no ficheiro de suporte. No caso referente aos dados de performance de arrefecimento, devido ao enquadramento das temperaturas disponibilizadas e ao intervalo de funcionamento da

bomba, também não foram disponibilizados à partida dados suficientes para aplicação direta. Assim sendo, procedeu-se à interpolação de dados atribuindo um novo caudal e temperatura de referência que se encontra dentro dos limites de interpolação permitidos por indicação de fornecedor [62]. Os valores de interpolação foram os valores médios, nomeadamente 1022 l/h e 4.44 °C (no caso de arrefecimento). Os valores base utilizados na introdução de dados dos ficheiros anexos encontram-se descritos na tabela 3.7. Os dados utilizados na parametrização do componente da bomba de calor geotérmica encontram-se na tabela 3.8.

Tabela 3.7: Valores de base utilizados na introdução de dados no *TYPE 927*

Aquecimento				Arrefecimento			
Caudal Normalizado		Temperaturas [°C]		Caudal Normalizado		Temperaturas [°C]	
Fonte	Carga	Fonte	Carga	Fonte	Carga	Fonte	Carga
0.8	0.8	-1.11	15.56	0.8	0.8	-1.11	10
0.9	0.9	10	26.67	0.9	0.9	4.44	21.11
1	1	21.11	37.78	1	1	10	32.22
			48.89				43.33

O caudal normalizado corresponde à divisão entre os caudais indicados nos dados de performance e o caudal de normalização indicado na tabela 3.8.

Tabela 3.8: Dados utilizados na parametrização do *TYPE 927*

Dados de parametrização da bomba		
Calor específico - fonte e carga	4.19	kJ/kg.K
Densidade fluido - fonte e carga	1000	kg/m ³
Aquecimento e Arrefecimento		
Nº de temperaturas na fonte	3	
Nº de temperaturas na carga	4	
Fluxos na fonte	3	
Fluxos na carga	3	
Normalização		
Potência Arrefecimento	5.07	kW
Potência Consumida	1.04	kW
Potência Aquecimento	4.31	kW
Potência Consumida	1.39	kW
Caudal na fonte	1136	l/h
Caudal na carga	1136	l/h

3.6 Permutador de Calor Terrestre

O dimensionamento e estudo de permutadores de calor no solo têm vindo a ser realizados maioritariamente através de softwares de simulação uma vez que apresentam fiabilidade suficiente. As formulações empíricas revelam apresentar valores tanto em excesso como em defeito quanto ao comprimento do permutador, o que tendo em conta o preço deste tipo de instalação não será de todo desejável [63]. De acordo com a informação presente no capítulo 2.4, foi tomada a opção de utilizar um permutador de calor vertical tendo atenção a elevada área apresentada como necessária na generalidade dos casos de permutadores calor horizontais. Apesar do seu inferior custo de instalação, tendo em conta o espaço cada vez mais reduzido no desenho urbano, foi tomada a opção de aplicar o método que requer menor área de aplicação, ou seja, um **permutador de calor terrestre vertical**.

Por forma a realizar o pré-dimensionamento e estudo da estrutura e disposição dos permutadores de calor, existem os seguintes softwares: *EED - Energy Earth Desygner*, *GLD - Ground Loop Design*, *GLHEPRO - Ground Loop Heat Exchanger Design* e *EWS - Program for Borehole Heat Exchangers*. De acordo com [64] o melhor método será aquele aplicado nos softwares *EED* e *GLHE*, cujo modelo de simulação se baseia no método *multipole* apresentado por *Bennet et al.*, 1987 [65]. No entanto todos eles não se encontram em livre acesso e as respetivas versões experimentais irão apresentar erros de calculo propositados ou insuficientes parâmetros de modelação. Por forma a dar continuidade, foram então consultados guias para um pré dimensionamento através de formulações empíricas. Os métodos consultados para este projeto foram a norma *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)* presente em [28] e as indicações facultadas pelo governo espanhol presentes em [25]. Consultado o documento presente [66], é possível afirmar que a aplicação das formulações empíricas apresentadas pela norma *ASHRAE* apresentam resultados inconsistentes. Os valores obtidos seguindo a norma apresentaram sobre dimensionamentos excessivos, desde 26 a 60% e para além disso, um caso de sub dimensionamento na ordem dos 20%. Assim sendo, foi realizado um pré-dimensionamento utilizando, maioritariamente, as formulações apresentadas em [25]. O método apresentado por este documento apresenta-se baseado na metodologia de dimensionamento indicada pela *Internacional Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA)*. Por forma a realizar o pré-dimensionamento geral foi necessário tomar decisões quanto a:

- Fluido Circulante
- Configuração a aplicar
- Seleção de tubos
- Pré-dimensionamento do permutador de calor enterrado

Tendo em conta o software principal (TRNSYS) e a metodologia geral, o fluido circulante selecionado foi água uma vez que não apresenta variação da performance da bomba. No entanto deverá ser tido em atenção que poderão ser aplicados outros fluidos de trabalho no permutador

de calor tais como Etilenoglicol, Propilenoglicol, Etanol e Metanol. A seleção de outro fluido de trabalho deverá ser tida em avaliação uma vez obtido o perfil real do solo e avaliação das temperaturas mínimas atingidas. Desta forma é possível anular o efeito de congelamento do fluido nas condições de temperatura mais baixas. Nessa situação, a seleção do fluido terá em conta os seguintes aspetos:

- Características de transferência de calor (condutividade térmica e viscosidade)
- Ponte de congelamento
- Pressão na tubulação e perdas de carga
- Corrosão, toxicidade e inflamabilidade
- Custo

Nesta instalação o a configuração aplicada foi vertical e em série. As respetivas vantagens e desvantagens poderão ser encontradas na secção 2.4.1. O tubo aplicado na perfuração será em U simples.

Os tubos seleccionados são do material polietileno PE100 com o diâmetro de 32 mm (PN10) [67]. A seleção de diâmetro foi calculada por forma a que o regime turbulento seja atingido nas condições de funcionamento e de acordo com os valores normalizados indicados. Tanto para o caudal ótimo da bomba como para o caudal mínimo de funcionamento, o regime turbulento foi atingido em ambos os casos. A tabela 3.9 corresponde ao calculo do número de Reynolds para o pré-dimensionamento da tubulação. A equação 3.2 apresenta o cálculo do número de Reynolds.

$$Re = \frac{4\dot{V}}{d_n \cdot \pi \cdot \nu} \quad (3.2)$$

Sendo que:

- \dot{V} corresponde ao fluxo volumétrico, neste caso em $[m^3/s]$, restantes em $[l/h]$;
- d_n corresponde diâmetro nominal do tubo, em $[m]$;
- ν corresponde à viscosidade cinemática do fluído, em $[m^2/s]$;
- Re corresponde ao número de Reynolds.

Tabela 3.9: Número de Reynolds em pré-dimensionamento

	\dot{V}	Re
Ótimo	1135.8	12265
Mínimo	908.64	9812
Considerando o fluído água a 10 °C		

A expressão 3.3 apresenta a resistência térmica realizada pela tubulação do permutador de calor terrestre.

$$R_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k_p} \cdot \ln \frac{D_0}{D_1} \quad (3.3)$$

Onde D_0 corresponde ao diâmetro exterior do tubo, D_1 corresponde ao diâmetro interior do tubo e k_p corresponde à condutividade térmica do material.

O calculo de temperaturas do solo, necessário ao pré dimensionamento, provém da equação 3.4 presente em [68].

$$T(z, t) = T_{m,s} - A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (3.4)$$

Sendo $T_{m,s}$ a temperatura média do solo a uma profundidade na qual não se notem variações ao longo do ano, A_s a oscilação máxima da temperatura à superfície num ano, t o tempo em dias, t_0 o numero de dias de defasamento e α a difusividade térmica do solo.

De acordo com [25], por forma a dar continuidade ao desenvolvimento do pré-dimensionamento foi necessário realizar o calculo das temperaturas máximas e mínimas do fluido à entrada da bomba de calor equações (3.6a, 3.6b) e as temperaturas máximas e mínimas do solo, a qualquer profundidade e considerando o ciclo anual equações (3.5a, 3.5b). As ultimas equações referenciadas advém da equação 3.4.

$$T_L(X_S) = T_m - A_s e^{-X_S \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \quad (3.5a)$$

$$T_H(X_S) = T_m + A_s e^{-X_S \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \quad (3.5b)$$

A_s irá corresponder ao valor médio entre a temperatura máxima e mínima registada ao longo do ano e o valor de α irá corresponder ao solo a considerar. Os valores possíveis de atribuição a α encontram-se na tabela presente no anexo C.3. X_S corresponde à profundidade definida. De acordo com o exemplo dado em [25] e com a metodologia seguida em [69,70], T_m irá corresponder à temperatura média anual do ar na localização a considerar, que neste caso foi o **Porto**. De acordo com o mapa presente na figura 2.29, o solo considerado foi **granito**.

$$T_{h,s} = T_{h,e} - \frac{1000 \cdot P_h \cdot \frac{COP_h - 1}{COP_h}}{C_p(\dot{V}/3600)} \quad (3.6a)$$

$$T_{c,s} = T_{c,e} + \frac{1000 \cdot P_c \cdot \frac{COP_c + 1}{COP_c}}{C_p(\dot{V}/3600)} \quad (3.6b)$$

Onde:

- T_e corresponde à temperatura máxima de entrada da bomba, em [°C];
- T_s corresponde à temperatura máxima de saída da bomba, em [°C];
- P corresponde potência térmica da bomba, em [kW];
- COP_h corresponde ao COP;
- COP_c corresponde ao EER;
- C_p corresponde ao calor específico do fluido [kJ/kg.K];
- \dot{V} corresponde ao fluxo volumétrico [l/h];
- índice h corresponde ao indicativo de aquecimento;
- índice c corresponde ao indicativo de arrefecimento.

As temperaturas máximas e mínimas de entrada do fluido na bomba de calor serão também um parâmetro importante a definir, sendo então necessário encontrar um compromisso ótimo nas seguintes considerações:

- Quanto mais baixa for a temperatura definida no inverno (e mais alta no Verão), maior será a diferença com a temperatura do solo e menor terá que ser o permutador de calor o que irá baixar os custos da perfuração do solo e respetiva instalação;
- Quanto mais alta a temperatura no Inverno (e mais baixa no Verão), maior será o COP do sistema levando a uma maior poupança de energia elétrica.

O intervalo selecionado para as temperaturas de entrada foi 11 a 12 °C, tanto para situações de aquecimento como arrefecimento. Este intervalo de temperaturas advém da temperatura média anual indicada para a localização considerada e também do tipo de permutador de calor considerado. As equações utilizadas para a média da temperatura mínima e máxima necessária nas formulações são apresentadas nas equações (3.7, 3.8).

$$T_{MIN} = \frac{1}{2} (T_{MAX,int} + T_{h,s}) \quad (3.7)$$

$$T_{MAX} = \frac{1}{2} (T_{MIN,int} + T_{c,s}) \quad (3.8)$$

Sendo que $T_{MAX,int}$ corresponde à temperatura máxima do intervalo selecionado para aquecimento e $T_{MIN,int}$ corresponde à temperatura mínima do intervalo selecionado para arrefecimento

O cálculo da resistência térmica do permutador de calor terrestre, segundo a metodologia até agora aplicada, encontra-se definido no anexo presente em [25]. No entanto este não se encontra num formato exequível e com complexidade passível de aplicação nesta dissertação. Recorrendo a outras ferramentas descritas em 3.6.1 foi possível realizar o calculo deste parâmetro. Não obstante será afirmar que este valor é aquele que apresenta maior complexidade e por sua vez deverá ser explorado em maior detalhe.

O fator de utilização (F) representa a fracção de tempo em que a bomba de calor se encontra em funcionamento e portanto, o tempo de operação sazonal da instalação. Este é um fator importante de projeto em sistemas geotérmicos pois determina a quantidade de calor que o sistema irá trocar com o solo ao longo do ano, ou seja, o calor que vai ser extraído do subsolo em modo de aquecimento e aquele que será injetado durante o modo de arrefecimento.

O método utilizado calcula o fator de utilização considerando o mês mais exigente para aquecimento e arrefecimento. De acordo com [71] o mês com temperatura média mais baixa é Janeiro e o mês com temperatura média mais alta é Agosto.

Segundo [25] a forma de calcular a carga térmica é assumir que esta é uma função linear da temperatura do ar externo. Sendo então necessário apenas saber a carga de aquecimento ou arrefecimento para dois valores de temperatura externa. Se for assumido, por exemplo, que o edifício exigirá apenas aquecimento para condições abaixo de 16 °C ou que exigirá arrefecimento a temperaturas acima de 21 °C, essa relação linear pode ser perfeitamente definida tomando o valor como o segundo ponto de cargas de projeto (condições mais desfavoráveis em aquecimento ou arrefecimento). No entanto neste caso, a carga de projeto de arrefecimento não se encontra nos meses mais quentes e assumir uma função linear levará sempre a incursão de erros. Tendo em conta as ferramentas disponíveis no software utilizado, foi calculada a carga térmica necessária no edifício para cada intervalo de temperatura específica recorrendo à análise dos dados referentes à análise da carga exigida pelo edifício obtidas na secção 3.4.

Apurando a carga necessária no edifício para cada hora ao longo do mês (P_{fixa,T_m}), foi realizada uma média aritmética segundo a carga necessária a uma determinada temperatura exterior e assim a obter uma carga fixa associada a um determinado intervalo de temperatura. Tal como indicado na equação 3.9.

$$P_{fixa,T_m} = \frac{\sum P_T}{N_p}; T \in [a; b[\quad (3.9)$$

Sendo $T_m = \frac{a+b}{2}$, N o número de potências registadas e P_{fixa,T_m} a carga do edifício determinada para T_m . A fracção de funcionamento (FF), calculada através da equação 3.10, corresponde ao quociente entre a carga térmica e a potência disponível, tanto para aquecimento como arrefecimento.

$$FF_{fixa,T_m} = \frac{P_{fixa,T_m}}{Potência\ Disponivel}; T \in [a;b[\quad (3.10)$$

Sendo FF_{fixa,T_m} a fracção de funcionamento da bomba correspondente a uma temperatura média fixa. As tabelas correspondentes aos valores obtidos referentes a encontram-se no anexo C.1. Para relacionar a fracção de funcionamento da bomba de calor para cada temperatura exterior com o numero de horas de funcionamento, é necessário conhecer o número de ocorrências em que a temperatura de ar exterior se encontra dentro de um determinado intervalo, ou seja, o *bin hour*. Este valor foi calculado segundo os dados climatológicos correspondentes ao *TYPE 15-6* ao obter os valores de temperatura ao longo do ano e fazendo uma contagem ao numero de ocorrências de temperatura num dado intervalo. A partir do *bin hour* correspondente e da fracção de funcionamento da bomba de calor é possível calcular o numero de horas que a bomba de calor estará em funcionamento nesse mês. Finalmente, o fator de utilização irá corresponder ao quociente entre o somatório do valor obtido de horas de funcionamento para cada T_m e o total de horas existentes no mês avaliado, tal como se apresenta na equação 3.11.

$$F = \frac{\sum \text{Horas Funcionamento}}{N^\circ \text{Horas Mês}} \quad (3.11)$$

Após reunir os dados necessários a aplicar nas equações referidas anteriormente, é possível obter o fator de utilização associado a cada modo de funcionamento. A tabela 3.10 apresenta o fator de carga para cada modo de funcionamento. Uma vez que neste caso se trata da avaliação de fator de carga e não de necessidades de pico pontuais, o parâmetro tido em conta para a seleção do mês critico foi o valor da temperatura média mensal.

Tabela 3.10: Fator de carga para cada modo de funcionamento

Modo	Mês	Horas de Funcionamento	Horas no mês	Fator de utilização (F)
Arrefecimento	agosto	112	744	15%
Aquecimento	janeiro	124	744	17%

A partir de todos os parâmetros definidos anteriormente será então possível determinar o comprimento necessário ao permutador de calor terrestre segundo as necessidades de aquecimento e arrefecimento [equações (3.12a, 3.12b)]. A tabela 3.11 apresenta os valores de pré-dimensionamento do comprimento do permutador de calor terrestre.

Tabela 3.11: Valores de pré-dimensionamento do comprimento do permutador de calor terrestre

Parametros		
R_p	0.0278	K/(W/m)
R_s	0.0393	K/(W/m)
T_L	12	°C
T_{MIN}	10.89	°C
T_{MAX}	13.32	°C
T_H	12	°C
\dot{V}	1132	l/h
Aquecimento		
COP_h	3.1	-
Q_h	4308	W
F_h	0.17	-
Arrefecimento		
COP_c	4.87	-
Q_c	5070	W
F_c	0.15	-

Serão então aplicadas as equações equações (3.12a, 3.12b) para calcular o comprimento do permutador de calor para necessidades de aquecimento (L_h) e de arrefecimento(L_c). No caso de permutadores de calor que sejam utilizados tanto para situações de aquecimento como arrefecimento, deverá ter sido em conta o maior valor registado sendo assim possível assegurar o bom funcionamento em ambos os caso.

$$L_h = \frac{P_h \cdot \frac{COP_h - 1}{COP_h} \cdot (R_p + R_s \cdot F_h)}{T_L - T_{MIN}} \quad (3.12a)$$

$$L_c = \frac{P_c \cdot \frac{COP_c + 1}{COP_c} \cdot (R_p + R_s \cdot F_c)}{T_{MAX} - T_H} \quad (3.12b)$$

Sendo que:

- P corresponde à potência térmica, em [W];
- R_p corresponde à resistência térmica dos tubos selecionados, em [K/(W/m)];
- R_s corresponde à resistência térmica do permutador de calor, em [K/(W/m)];
- F corresponde ao fator de utilização;

- T_L corresponde à temperatura mínima do solo, em [°C];
- T_H corresponde à temperatura máxima do solo, em [°C];
- T_{MIN} corresponde à média da temperatura mínima na bomba de calor, em [°C];
- T_{MAX} a média da temperatura máxima na bomba de calor, em [°C].

De acordo com [28] as perfurações variam entre 15 a 120 m dependendo das condições de perfuração do local e o equipamento disponível de perfuração, podendo em alguns casos atingir distancias de perfuração de 180 m. A tabela 3.12 apresenta os valores obtidos para o comprimento final do permutador de calor terrestre.

Tabela 3.12: Comprimento final do permutador de calor terrestre de acordo com o modo de funcionamento da bomba

Parametros finais de pré-dimensionamento			
Comprimento Total	Aquecimento (L_h)	91	m
	Arrefecimento (L_c)	156	m
Número de perfurações	2		
Comprimento/Furo	Aquecimento	45	m
	Arrefecimento	78	m

Por forma a dar continuidade à simulação, foi aplicado o pré-dimensionamento efetuado às necessidades de entrada no componente presente no software, o *TYPE 557a*. Este componente corresponde a um permutador de calor vertical. O modelo presente neste componente assume que os furos são colocados uniformemente num volume de armazenamento cilíndrico no interior do solo. Assume a transferência de calor por convecção dentro da tubulação e transferência de calor por condução para o volume de armazenamento. A temperatura do terreno envolvente é calculada a partir de três partes - temperatura global, solução local e solução de fluxo constante. O fluxo constante é obtido analiticamente. A temperatura resultante advém de métodos de superposição [58, 72]. A descrição matemática não será explorada devido à sua complexidade adjacente, no entanto poderá ser consultada em [73]. A tabela 3.13 apresenta os valores inseridos por forma a modelar o permutador vertical térmico no componente seleccionado.

Tabela 3.13: Valores inseridos no *TYPE 557a*

PARAMETROS TRNSYS		
Storage volume	4863	m ³
Borehole depth (z_b)	78	m ³
Number of boreholes (N_b)	2	
Borehole radius	0.0625	m
Storage thermal conductivity	3.5	W/m.K
Storage heat capacity	2550	kJ/m ³ /K
Outer radius	0.032	m
Inner radius	0.03	m
Center-to-center	0.0465	m
Fill thermal conductivity	1.47	W/m.K
Pipe thermal conductivity	0.39	W/m.K
Reference borehole flow rate	0.31545	kg/s
Reference temperature	12	C
Initial surface temperature	12	C
Thermal conductivity of layer	3.5	W/m.K

Todos os valores inseridos na modelação do componente advém do pré-dimensionamento. No caso específico do parâmetro de *storage volume* foi necessário indicar o valor do distanciamento entre as perfurações. O volume definido estará de acordo com o resultado da equação que se segue.

$$V_s = \pi N_b z_b (0.525s)^2 \quad (3.13)$$

Sendo que:

- N_b corresponde ao numero de perfurações;
- z_b corresponde à profundidade da perfuração, em [m];
- s corresponde à distancia entre perfuração, em [m].

De acordo com [28] deverá ser tida em análise a distancia entre perfurações devido à interferência térmica entre as mesmas. Neste caso foi aplicada a distancia mínima recomendada para disposições em grelha sendo portanto 6 m o valor aplicado.

3.6.1 Resistência Térmica do Permutador

Referenciando documentos sobre o exercício prático, normalmente o calculo da condutividade térmica para o dimensionamento de um sistema de bomba de calor geotérmica pode ser realizado através de testes laboratoriais sobre provetes do terreno alvo reconhecido ou realizar TRT. O TRT

apresenta-se como o método mais fiável e o único recomendado para instalações de média e grande capacidade [25].

O documento apresentado no pré dimensionamento apresenta alguma informação relativamente ao seu cálculo. No entanto, devido à sua complexidade e relevo para esta dissertação foi optado por um processo alternativo e exequível para a metodologia apresentada. De outra forma seria desviado o foco principal do trabalho desenvolvido. Assim sendo, o cálculo da resistência térmica associada ao permutador de calor no solo irá ser realizada segundo as bases teóricas disponíveis.

A precisão de dados relativamente à resistência térmica do permutador é importante não apenas para efeitos de análise mas também uma característica chave no permutador, quanto mais baixa a resistência térmica melhor será a performance. Elevada resistência térmica irá resultar em maior diferença de temperatura entre a parede do furo e o fluido circulante. Desta forma é diminuída a eficiência da bomba comparativamente a uma baixa resistência térmica.

De acordo com [74], a equação presente em [75] revela ser a que melhor se adequa em todas as soluções numéricas obtidas nos diferentes posicionamentos da tubulação, no caso de aplicação de apenas um formato U. Todas as outras formulações em avaliação apresentam resultados menos satisfatórios tendo em conta as diferentes disposições da tubulação. Atendendo às conclusões presentes em [74] e à tabela resumo 3.14 foi seleccionada a proposta de cálculo presente na equação 3.14. A tabela 3.14 apresenta os resultados da variação de valor da resistência térmica relativamente a um valor referência segundo várias propostas de equação de cálculo.

Tabela 3.14: Resultados da variação de valor da resistência térmica relativamente a um valor referência segundo várias propostas de equação de cálculo, retirado de [74].

Equation	Best Fit configuration	Worse Fit configuration	Parameters used
Paul (1996)	Along Outer Wall (4.95-13.46 %)	Average (31.0-24.27%)	$\beta_o, \beta_i, d_p, d_b, k_g$
Bennet et al., (1987)	All (0.0-1.255%)	N/A	s, d_p, d_b, k_g, k_s
Gu and O'Neal (1998)	Along Outer Wall (4.81-13.94%)	Close Together (13.33-11.43%)	s, d_p, d_b, k_g
Hellstrom (1991)	Along Outer Wall (0-4%)	Close Together (13.13-11.76%)	s, d_p, d_b, k_g, k_s
Shonder and Beck (1999)	Close Together (13.33-11.34%)	Along Outer Wall (98.25-63.91%)	d_p, d_b, k_g
Sharaqawy et al. (2009)	Close Together (9.33-1.3%)	Along Outer Wall (48.97-58.97%)	s, d_p, d_b, k_g

A proposta apresentada em [75] propõe uma equação baseada no método *multipole* que resolve problemas de estado estacionário por forma a estimar os valores de resistência térmica. Neste método a resistência é obtida estabelecendo uma temperatura na parede do tubo U e determinando depois o fluxo de calor e o perfil de temperaturas da circunferência em torno da parede do tubo U. A equação utilizada para o calculo apresenta-se de seguida. A equação 3.14 apresenta a expressão utilizada para o cálculo da resistência térmica do permutador de calor terrestre.

$$R_s = \frac{1}{4k_g\pi} \left(\ln \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2^{1+4\sigma}}{2(\lambda_2^4 - 1)^\sigma} \right) - \frac{\lambda_3^2 (1 - (4\sigma/(\lambda_2^4 - 1)))^2}{1 + \lambda_3^2 (1 + (16\sigma/(\lambda_2^2 - \frac{1}{\lambda_2^2}))^2)} \right) \quad (3.14)$$

Sendo k_g a condutividade térmica da argamassa, k_s a condutividade térmica do solo, $\lambda_1 = \frac{d_b}{d_p}$, $\lambda_2 = \frac{d_b}{s}$, $\lambda_3 = \frac{d_p}{2s} = \frac{\lambda_2}{2\lambda_1}$, $\sigma = \frac{k_g - k_s}{k_g + k_s}$, s a distancia entre os centros dos tubos em U, d_b o diâmetro da perfuração e d_p o diâmetro da tubulação. A figura 3.7 apresenta os formatos genéricos de tubulação em U.

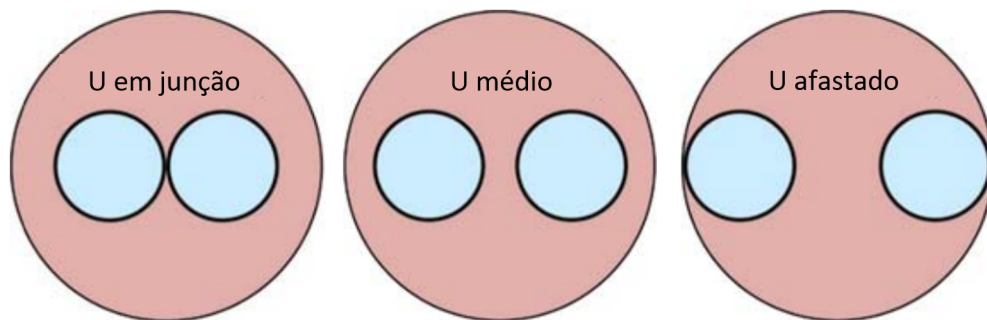


Figura 3.7: Formatos genéricos de tubulação em U [27].

Os parâmetros dos quais depende o calculo da resistência térmica deverão ser avaliados segundo a sua influencia perante o valor final, uma vez que aqui se encontra uma fase crucial de projeto com elevado relevo para a otimização do sistema e redução de custo global. De acordo com [74] existe uma afetação ao resultado final de calculo importante dependendo da decisão tomada referente aos seguintes aspetos:

- Espaçamento entre tubulação
- Quociente entre o diâmetro da tubulação e da perfuração
- Condutividade térmica da argamassa

Os efeitos referentes à espessura da tubulação, atendendo ao seguimento de um diâmetro nominal standard *SDR*, e os efeitos referentes à condutividade térmica da tubulação não apresentam relevância no valor final.

O valor da resistência térmica aumenta com o aumento do quociente entre o diâmetro da tubulação e da perfuração. Diminuir o diâmetro do tubo leva a uma diminuição do fluxo de calor e portanto a uma menor troca de calor. Para além disso, o diâmetro da perfuração também deverá ser analisado uma vez que um aumento do diâmetro de perfuração leva a uma aumento do quociente. Os valores apresentados de intervalo em [28] apresentam diâmetros de perfuração entre 100 e 150 mm.

Vazios de ar ou separação entre o solo e os materiais de enchimento devem ser evitados, pois o ar é um isolante natural. Se a argamassa não conduzir eficientemente o calor, ela será considerada um isolante e, portanto, reduzirá a eficiência do sistema de GHP. O material de argamassa deve conter componentes de custo satisfatório, ambientalmente seguros e prontamente disponíveis, e

deve ser fácil de misturar e bombear com equipamentos convencionais de injeção de materiais geotécnicos. Além disso, a argamassa deve ter baixo encolhimento e boas características de ligação ao loop U e ao terreno circundante, bem como a durabilidade a longo prazo. Atualmente os materiais utilizados são argamassas de bentonite melhoradas com a adição de areia de quartzito [76]. Quanto maior for o rácio da capacidade de condução térmica entre a argamassa e solo, menor será o coeficiente de resistência térmica do permutador de calor terrestre. A tabela correspondente à consulta dos materiais encontra-se no anexo C.2.

O valor de espaçamento entre tubos no furo terá de estar entre os limites mínimo (s_{min}) e máximo (s_{max}) de espaçamento sendo então:

$$s_{min} = d_p \quad (3.15a)$$

$$s_{medio} = \frac{1}{3}d_b \quad (3.15b)$$

$$s_{max} = d_b - d_p \quad (3.15c)$$

Todos os casos apresentados em [74] apresentam o valor maior de resistência térmica no caso de tubulação U em junção e o valor mais baixo no caso de U afastado. A configuração selecionada para o formato de tubo U foi a configuração de **U afastado**.

Tabela 3.15: Resistência térmica do permutador de calor terrestre de acordo com o espaçamento entre tubos

Formato	s [m]	R _b [K/(W/m)]
U em junção	0.032	0.0989
U médio	0.042	0.0881
U afastado	0.093	0.0393

Os valores finais selecionados para os parâmetros de cálculo da resistencia térmica do permutador de calor terrestre encontram-se na tabela 3.16

Tabela 3.16: Valores finais de calculo da resistência térmica do permutador de calor terrestre

Parametros iniciais		
k _g	1.47	W/k.m
k _s	3.4	W/k.m
d _B	0.125	m
d _P	0.032	m
s	0.093	m
R _b	0.0393	[K/(W/m)]

Capítulo 4

Análise de resultados

4.1 Análise de resultados sem aplicação da bomba de calor geotérmica

Por forma a entender o comportamento da monozona foram realizadas duas simulações iniciais sendo que num caso não deveria ser aplicado o controlo de temperatura deixando que o modelo de teste respondesse às condições atmosféricas sem qualquer tipo de aquecimento ou arrefecimento. No outro caso seriam aplicadas as ferramentas presentes no software *TRNBuild* realizando um controlo de temperatura interna através de aquecimento e arrefecimento proporcionado pelo software sem limite de potência a aplicar. A figura 4.1 apresenta as temperaturas da monozona caso não seja efetuado qualquer tipo de climatização ou controlo de temperatura.

Ao observar a figura 4.1 é possível verificar que a temperatura interna apresenta uma elevada variação tendo em conta que as temperaturas podem variar num curto espaço de tempo desde os 10 °C até aos 45 °C revelando assim uma necessidade de resposta eficaz e rápida. Também será de realçar que as temperaturas mais elevadas se encontram nas estações de inverno e outono o que não seria de esperar tendo em conta uma maior temperatura ambiente nos meses de verão. A razão passível de apontar para esta situação prende-se com as características da própria monozona de teste. A elevada área de janela e a sua disposição a sul leva a que grande parte da radiação penetre para o interior do modelo. Para além disso acresce também o facto de a radiação solar incidente vinda de Sul é superior à medida que se aproxima a estação de Inverno. O conceito associado a este fenómeno denomina-se altura solar. Ou seja, uma vez que a altura solar é mais baixa haverá então maior incidência direta de radiação nas janelas.

A figura 4.2 apresenta a temperatura da monozona resultante do controlo de temperatura do interior da mesma, realizado através do software indicado. A tabela 4.1 indica o intervalo horário correspondente de acordo com uma simulação anual.

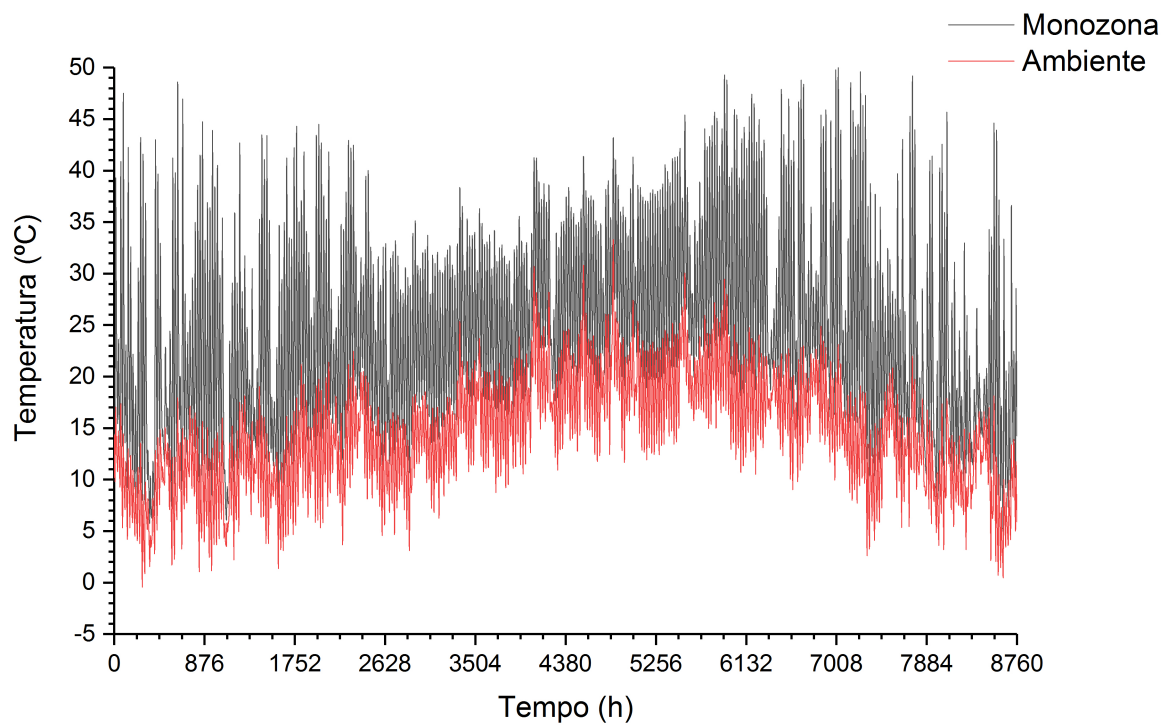


Figura 4.1: Temperatura da monozona ao longo de um ano sem climatização

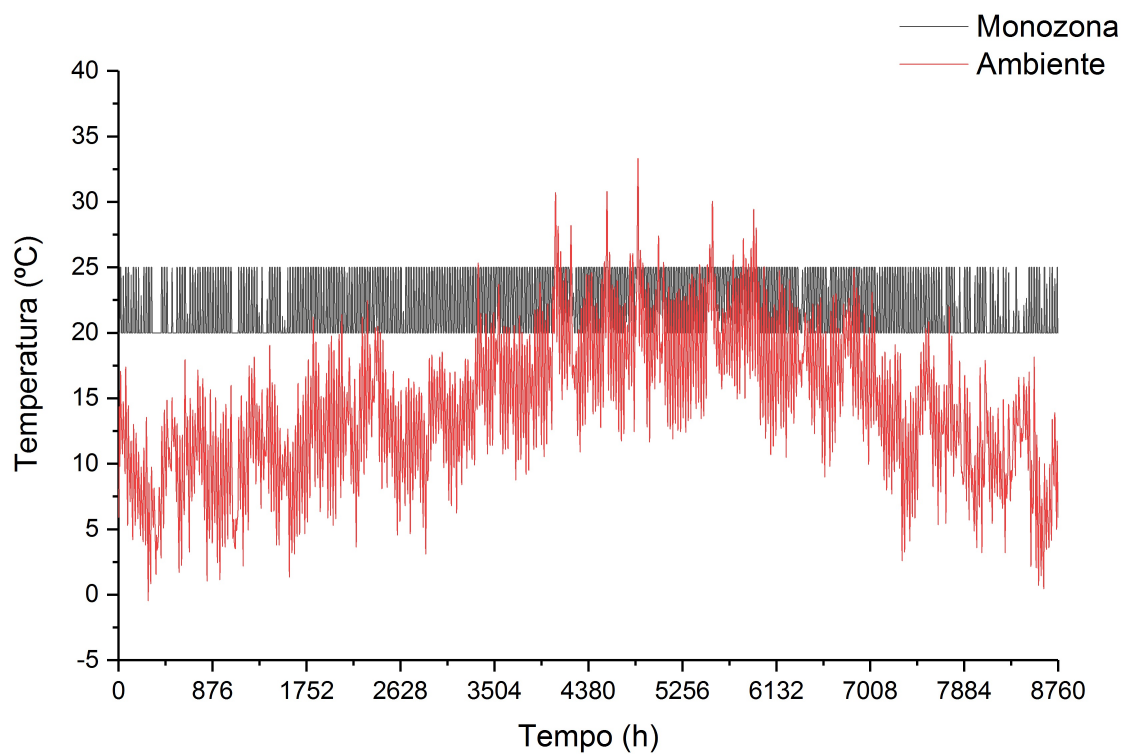
Figura 4.2: Temperatura da monozona ao longo de um ano com controlo *TRNBuild*

Tabela 4.1: Intervalo horário correspondente ao mês do ano com simulação anual

MÊS	HORA		DIAS
	Início	Fim	
JAN	0	744	1
FEB	744	1416	32
MAR	1416	2160	60
APR	2160	2880	91
MAY	2880	3624	121
JUN	3624	4344	152
JUL	4344	5088	182
AUG	5088	5832	213
SEP	5832	6552	244
OCT	6552	7296	274
NOV	7296	8016	305
DEC	8016	8760	335

O *TRNBuild* permite a incorporação das temperaturas de climatização e o cálculo da potência térmica aplicada na monozona. A partir desta ferramenta é possível obter as cargas máximas de aquecimento e arrefecimento. As temperaturas de controlo foram respetivamente 20 °C como temperatura mínima e a temperatura máxima foi de 25 °C, sendo assim respeitadas as indicações em [59]. A figura 4.3 apresenta as temperaturas, ambiente e da monozona, registadas no dia mais quente do ano, nomeadamente no mês de julho. A figura 4.4 apresenta as temperaturas, ambiente e da monozona, registadas no dia mais frio do ano sem qualquer tipo de controlo de temperatura, nomeadamente no mês de janeiro.

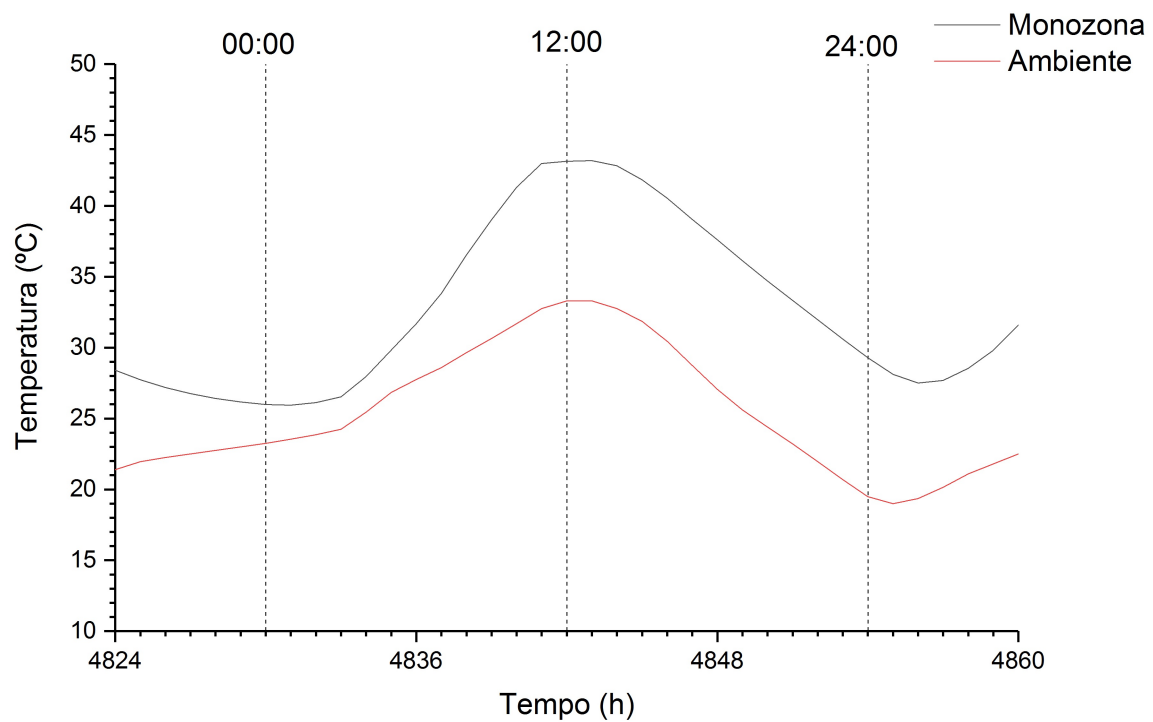


Figura 4.3: Temperatura ambiente e da monozona, sem controlo de temperatura, no dia de temperatura máxima

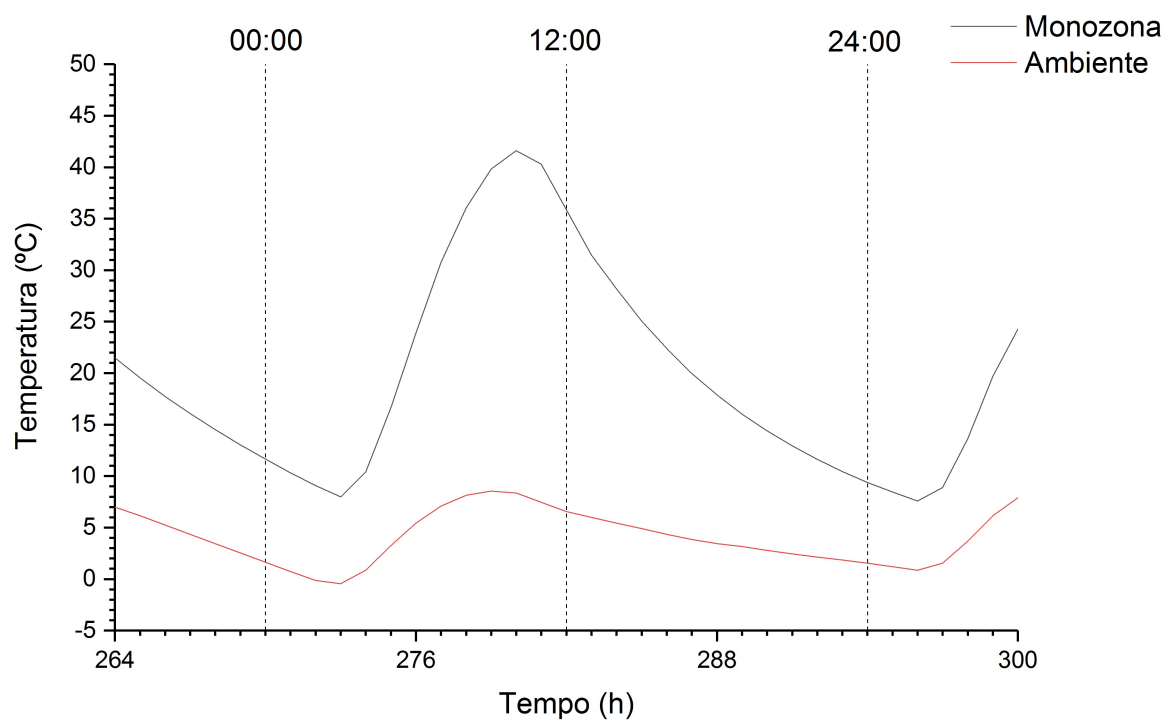


Figura 4.4: Temperatura ambiente e da monozona, sem controlo de temperatura, no dia de temperatura mínima

De acordo com os resultados apresentados é possível observar, na hora de maior temperatura do dia de temperatura máxima, um intervalo de cerca de 10 °C entre a temperatura ambiente e a monozona. No entanto, o dia de temperatura mínima apresenta um intervalo de 30 °C, sensivelmente.

A figura 4.5 apresenta as potências de aquecimento ao longo de um ano e a figura 4.6 apresenta as potências de arrefecimento ao longo do mesmo período. Estes valores advêm do controlo de temperatura referido anteriormente.

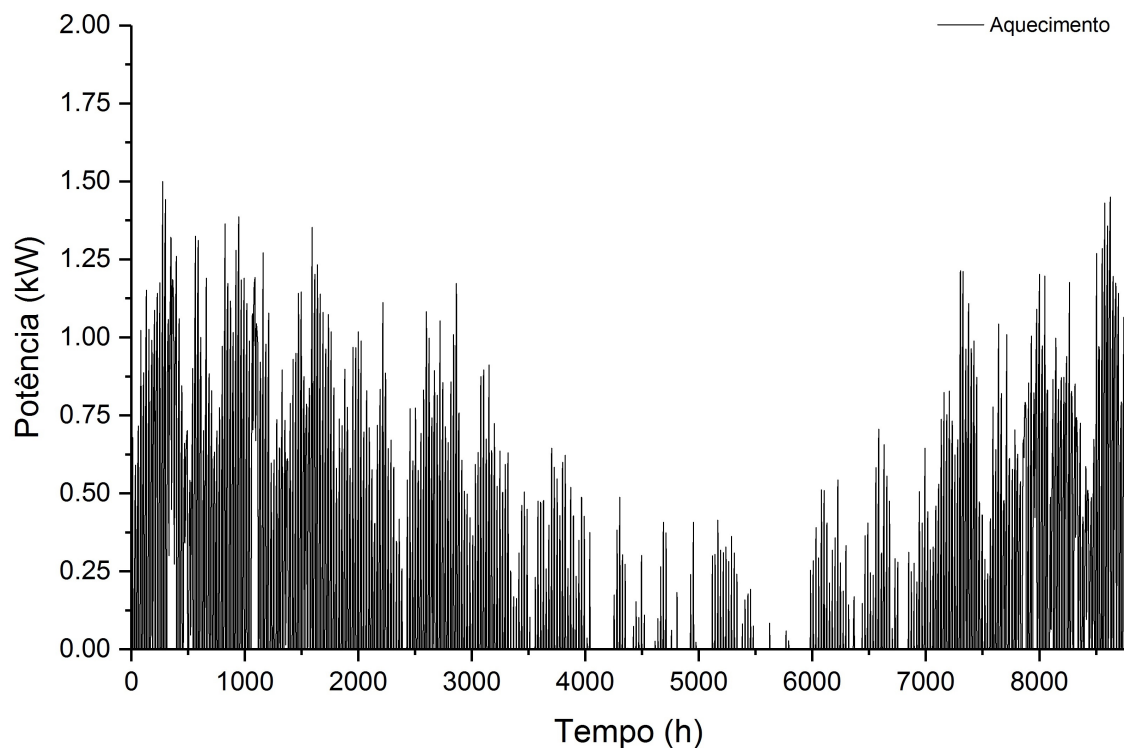


Figura 4.5: Potência térmica de aquecimento ao longo de um ano com *TRNBuild*

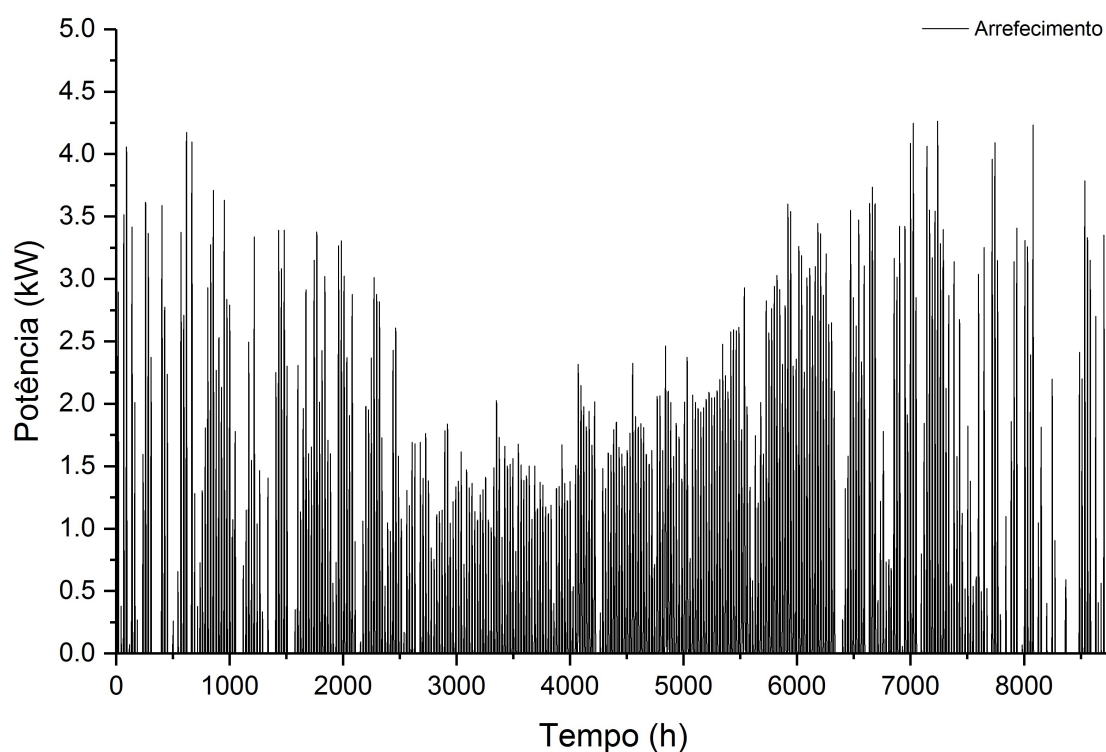


Figura 4.6: Potência térmica de arrefecimento ao longo de um ano com *TRNBuild*

Ao analisar os dados referentes à potência térmica de aquecimento e arrefecimento ao longo de um ano foi possível obter as cargas máximas a aplicar na monozona e definir a bomba de calor necessária nesta situação. No caso de aquecimento a potência necessária não ultrapassa 1.5 kW e o seu período de ocorrência dá-se ao longo de todo o ano com exceção dos meses de Verão, onde a frequência e carga necessárias são reduzidas. No entanto no caso de arrefecimento a potência encontra-se superior que o caso de aquecimento, ultrapassando 4 kW. A necessidade de arrefecimento dá-se ao longo de todo o ano sendo que os valores mais altos não se situam na estação de verão mas sim na estação de outono e inverno. Esta situação deve-se ao fenómeno explicado no início do capítulo, a diminuição da altura solar em relação às características da monozona. Os valores referentes às cargas de pico encontram-se indicados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Potências de pico registadas na monozona ao longo de um ano com *TRNBuild*

Modo	Potência Máxima [kW]	Hora do ano [h]	Mês
Aquecimento	1.50	277	janeiro
Arrefecimento	4.26	7239	outubro

A figura 4.7 apresenta a energia térmica mensal aplicada na monozona de acordo com o sistema de cálculo *TRNBuild*. A tabela 4.3 apresenta os valores associados à energia térmica mensal aplicada no edifício de acordo com o sistema de cálculo *TRNBuild*. Ao realizar o somatório de todos os valores registados em cada mês é possível obter os valores mensais de energia.

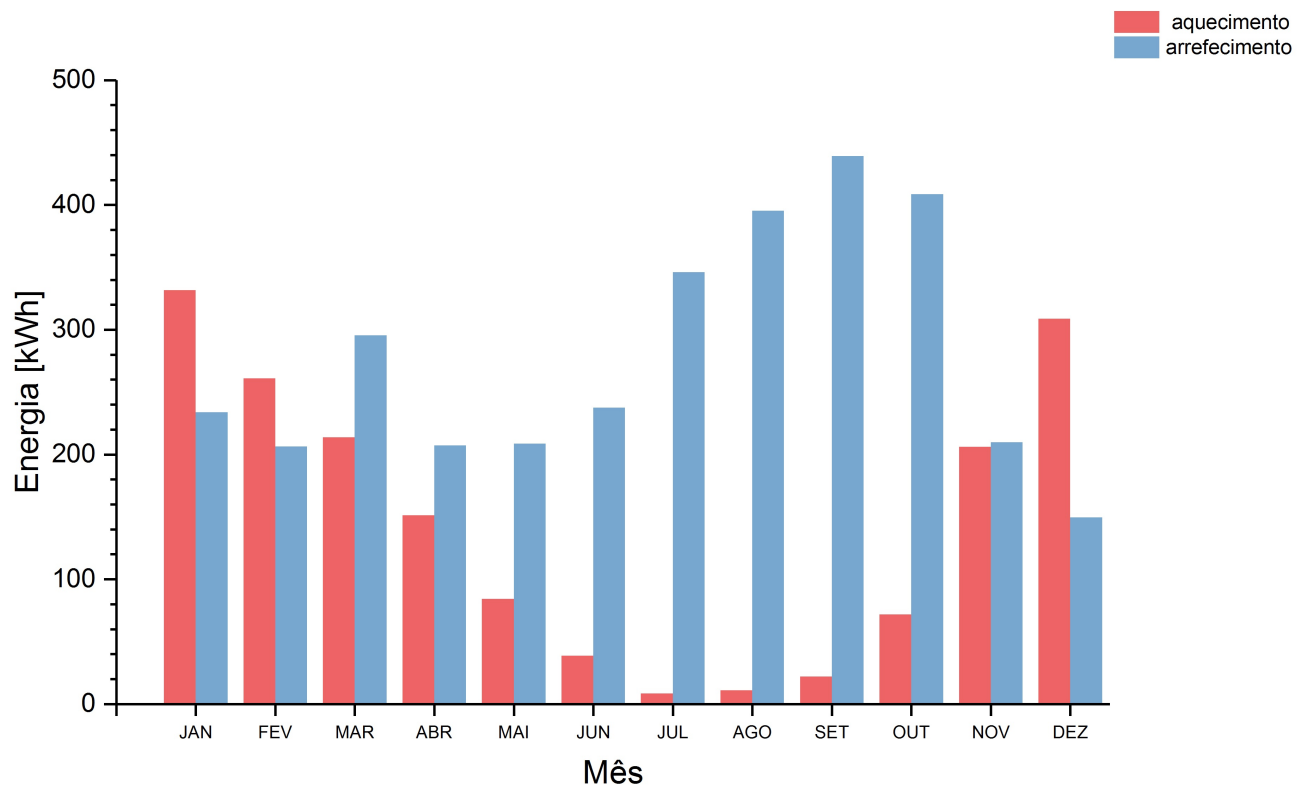


Figura 4.7: Energia térmica mensal aplicada no edifício de acordo com *TRNBuild*

Tabela 4.3: Energia térmica mensal aplicada aplicada no edifício de acordo com *TRNBuild*

ENERGIA TERMICA MENSAL [kWh]		
MÊS	AQUECIMENTO	ARREFECIMENTO
janeiro	331.87	234.07
fevereiro	261.01	206.55
março	213.78	295.51
abril	151.50	207.41
maio	84.44	208.68
junho	38.93	237.67
julho	8.34	346.15
agosto	10.90	395.35
setembro	21.90	439.21
outubro	71.92	408.62
novembro	206.29	209.93
dezembro	308.78	149.72
ANUAL	1709.67	3338.85

Ao observar a figura 4.7 é possível verificar a necessidade permanente de arrefecimento ao longo do ano com especial atenção para os meses entre Julho e Outubro, inclusivé. Neste caso a energia transferida chega ao dobro dos restantes meses do ano. No caso de aquecimento será de notar a baixa necessidade nos meses de verão. A figura 4.8 apresenta a potência registada no dia de maior exigência de aquecimento, ou seja, a potência de pico em aquecimento. A figura 4.9 apresenta a potência registada no dia de maior exigência de arrefecimento, ou seja, a potência de pico em arrefecimento.

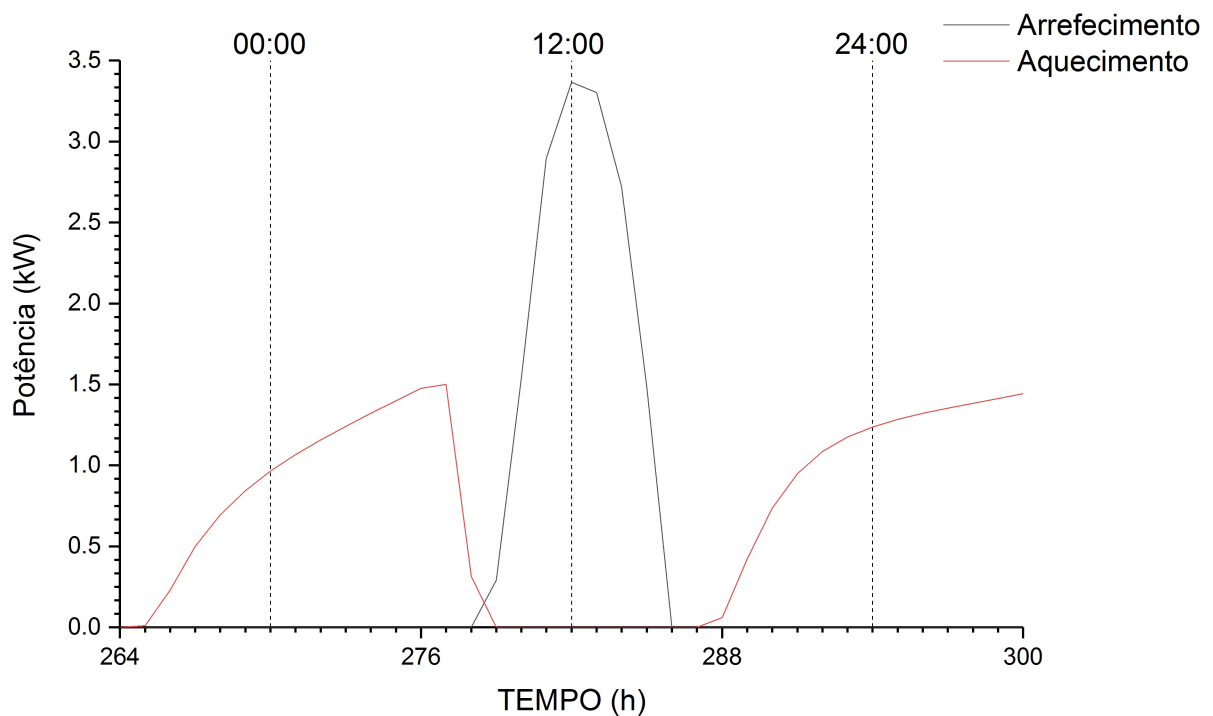


Figura 4.8: Potência registada no dia de potência de pico em aquecimento com *TRNBuild*

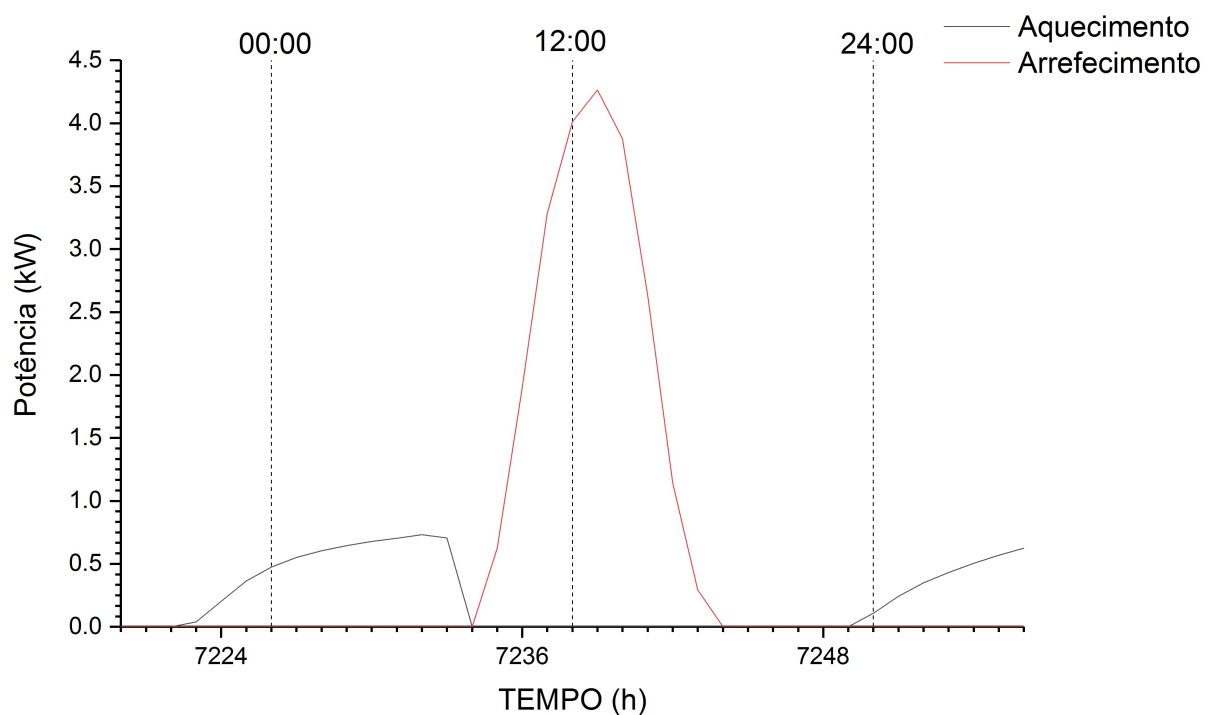


Figura 4.9: Potência registada no dia de potência de pico em arrefecimento com *TRNBuild*

A observar a figura 4.8 é possível verificar que o dia onde se regista maior potência de aquecimento coincide com o dia de menor temperatura, registado na 4.4. No entanto, o dia registado com maior potência de arrefecimento não coincide com o dia de temperatura máxima nem nos meses de verão. Ao observar a figura 4.9 é possível verificar que a potência máxima de arrefecimento é registada perto do fim do mês de outubro. A figura 4.10 apresenta a temperatura registada no dia de potência de pico em arrefecimento e a figura 4.11 apresenta a potência registada no dia com temperatura máxima.

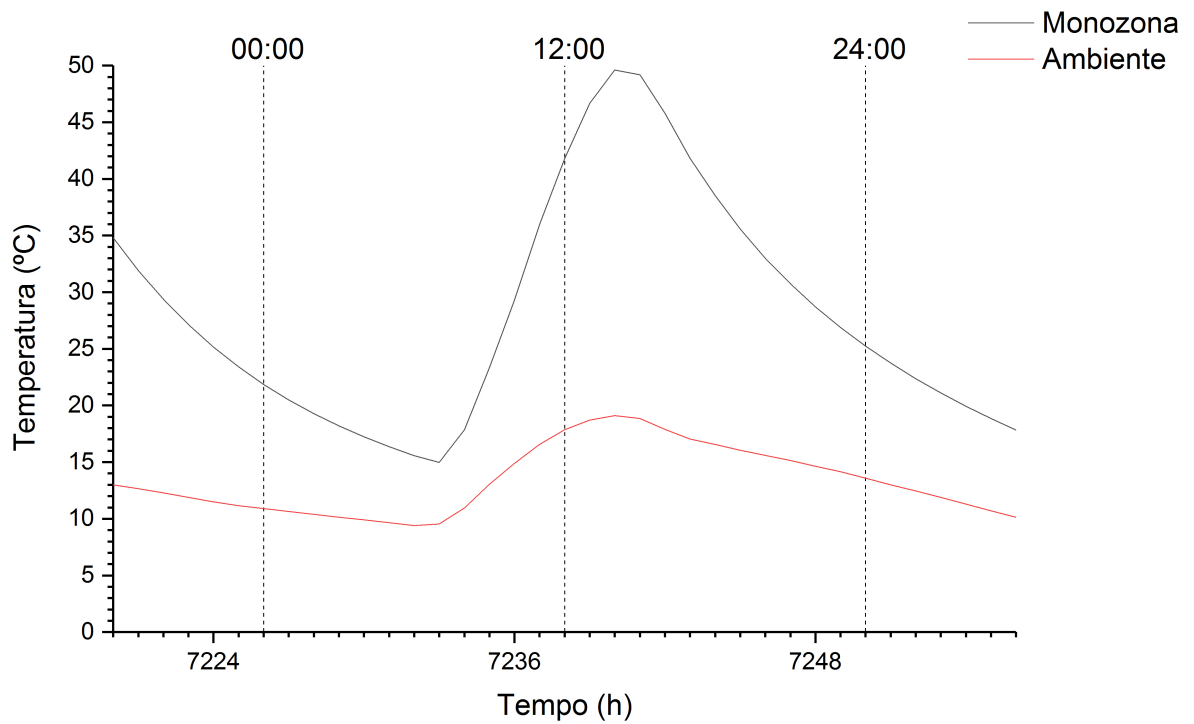


Figura 4.10: Temperatura registrada no dia de potência de pico em arrefecimento com *TRNBuild*

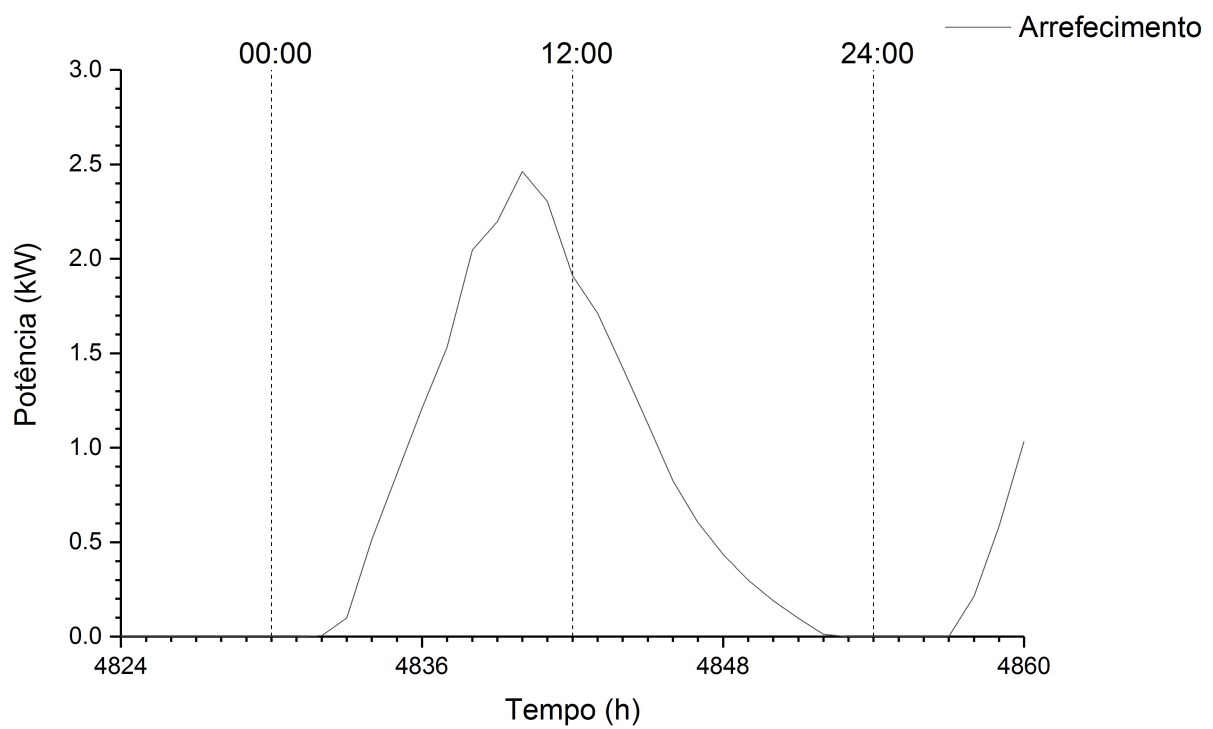


Figura 4.11: Potência térmica registrada no dia com temperatura máxima com *TRNBuild*

Ao observar a figura 4.10 é possível verificar que a temperatura máxima encontra-se inferior à temperatura máxima registada ao longo de um ano. A figura 4.11 apresenta uma potência máxima de cerca de 2.5 kW o que é claramente inferior à potência máxima registada na 4.9.

4.2 Análise de resultados com aplicação da bomba de calor geotérmica

4.2.1 Resultados referentes a temperaturas

Por forma a obter a temperatura da monozona com o sistema de climatização presente no capítulo 3.3 foi realizada a simulação com as condições de controlo geral indicadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Dados de controlo da simulação

Parametro	Valor	
Início	0	h
Fim	9504	h
Intervalo	0.25	h
Tolerancia Integração	0.001	
Tolerancia Convergência	0.1	

Por forma a permitir a estabilização do sistema e melhorar a análise de dados, ao processar os dados e transformá-los em gráfico foram trocados os valores do primeiro mês de janeiro pelo último de simulação. Ou seja, sendo que um ano tem 8760 horas a simulação foi efetuada acrescentando o mês de janeiro novamente no fim perfazendo então um total de 9504 horas. De seguida foram trocados os valores obtidos no primeiro mês pelo ultimo e conseguir assim uma melhor avaliação de janeiro a dezembro. A figura 4.12 apresenta a temperatura da monozona com climatização modelo ao longo de um ano.

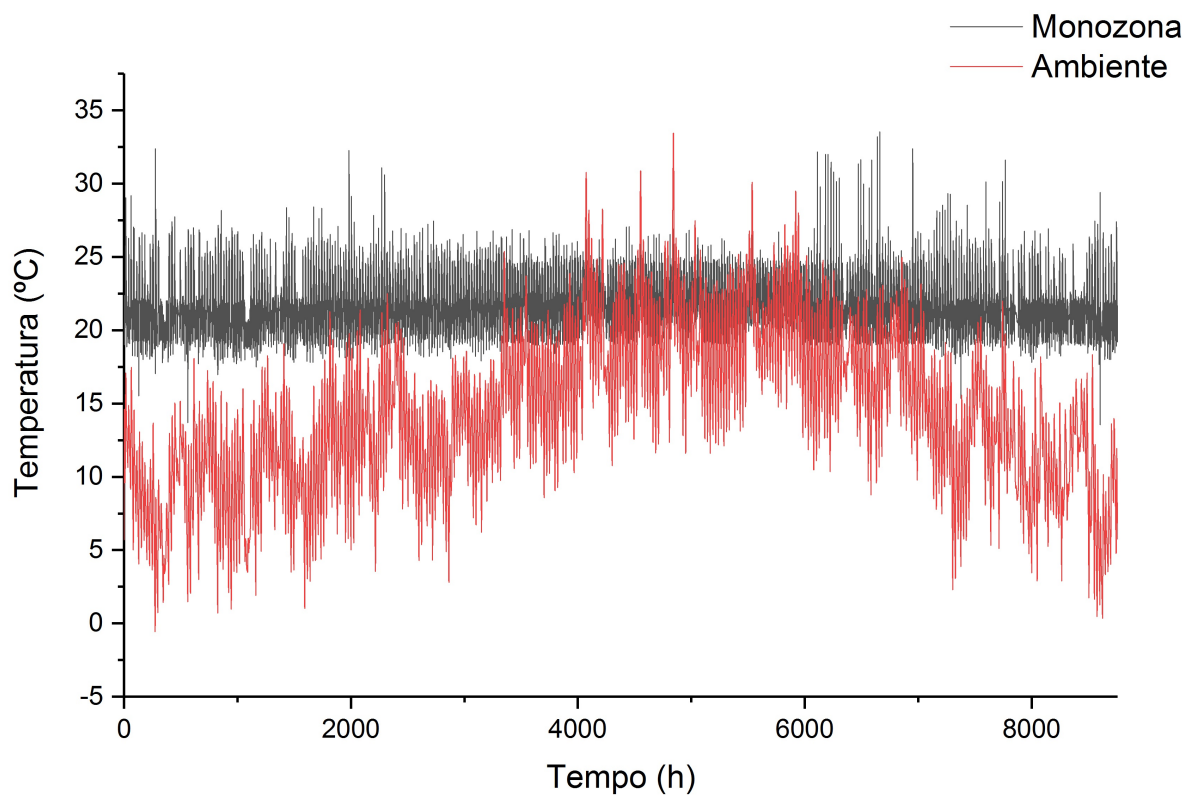


Figura 4.12: Temperatura da monozone com climatização modelo

Ao observar a figura 4.12 é possível verificar que se encontram alguns pontos onde a temperatura de conforto não é respeitada, maioritariamente nos casos de necessidade de arrefecimento. Após as 6000 horas (meio de Setembro) o sistema não apresenta resposta positiva perante as necessidades impostas. A figura 4.13 apresenta a variação da temperatura da monozone para o mês de Janeiro de acordo com a variação do valor de tolerância de convergência e a figura 4.14 apresenta as mesmas variações para o mês de Outubro. Estes foram os meses seleccionados devido ao facto de, tal como a tabela 4.2 indica, serem aqueles onde se verifica maior carga de pico e assim sendo maior exigência.

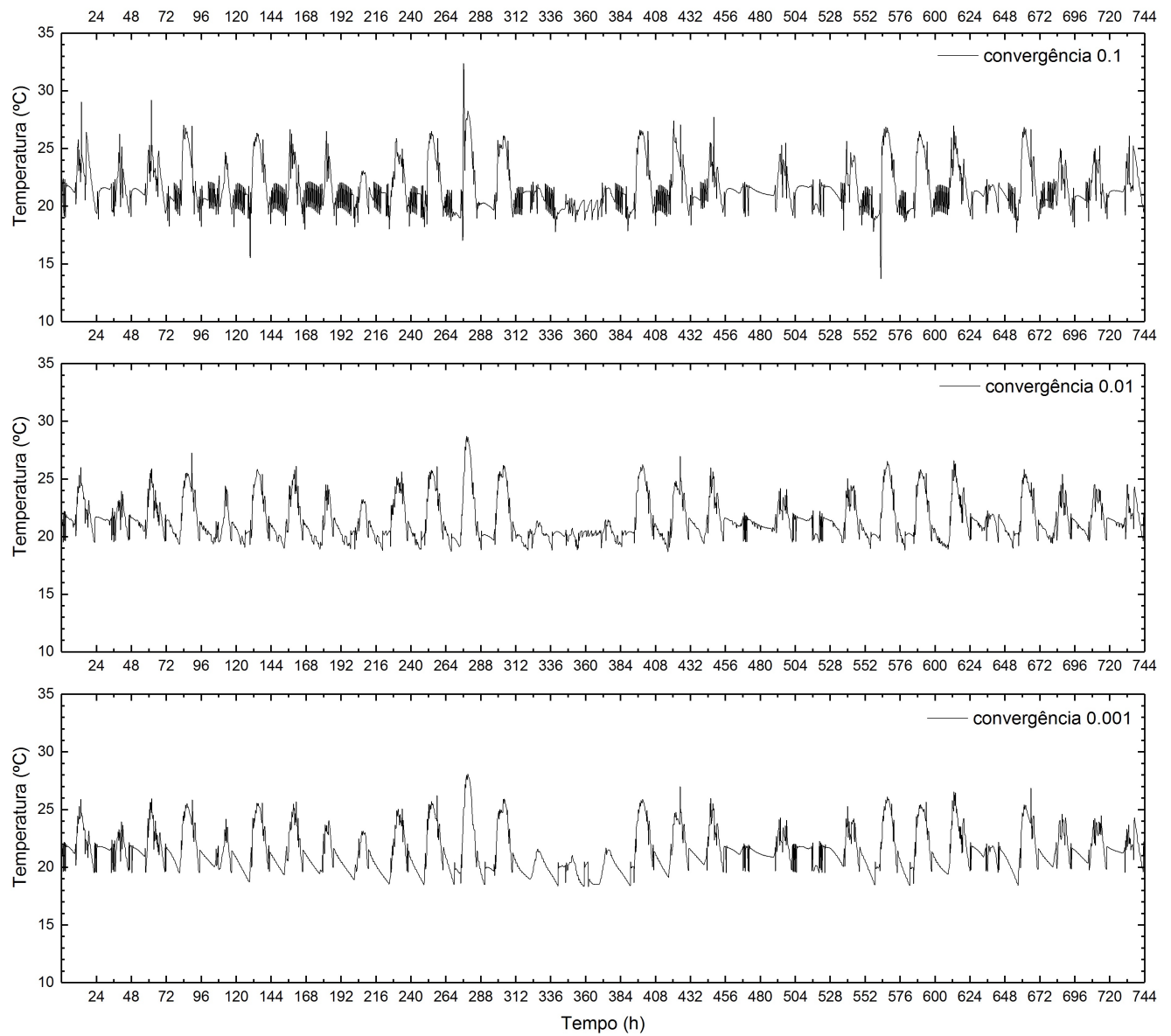


Figura 4.13: Variação da temperatura da monozona no mês de Janeiro de acordo com a tolerância de convergência

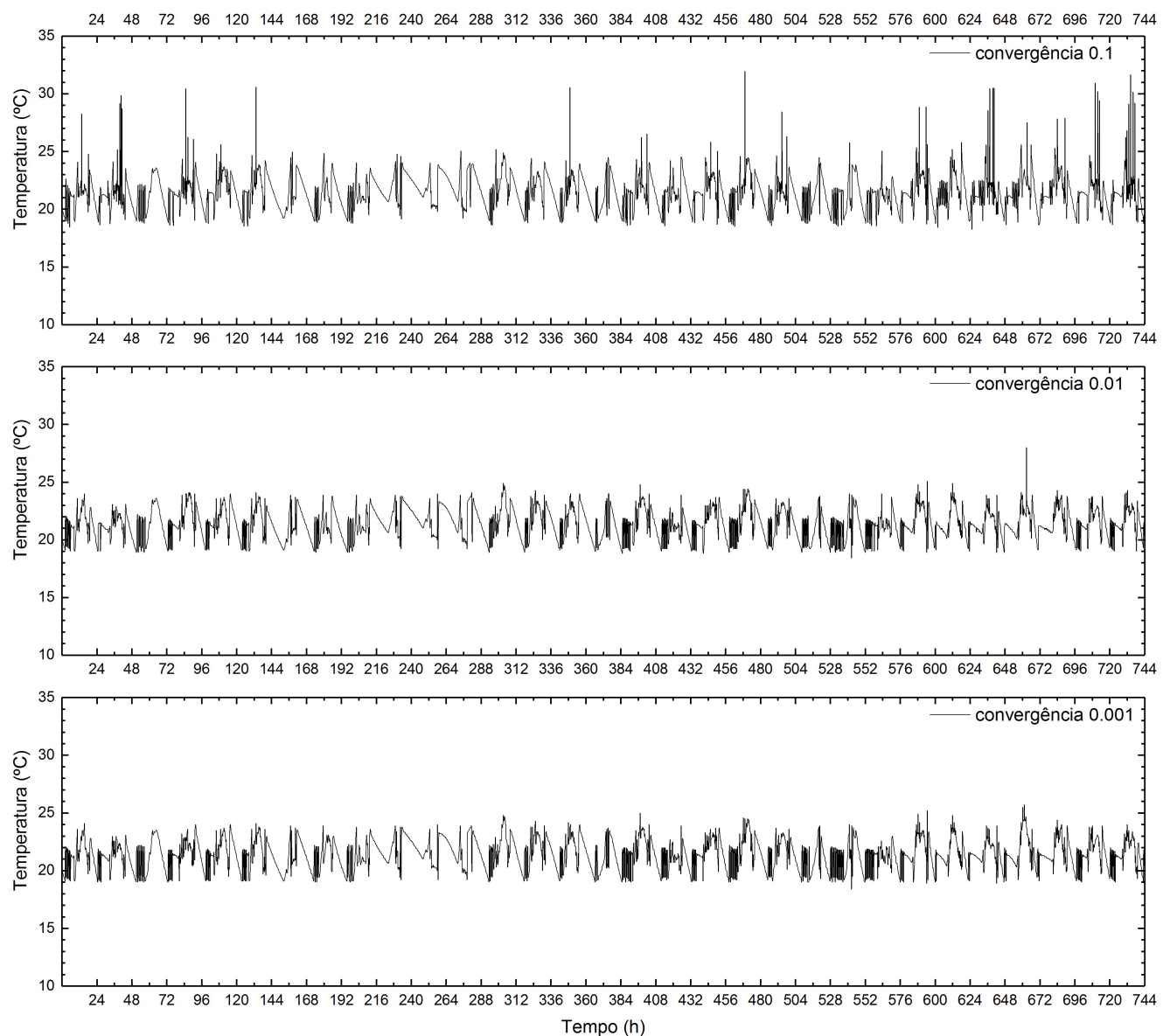


Figura 4.14: Variação da temperatura da monozona no mês de Outubro de acordo com a tolerância de convergência

O valor de convergência é aplicado na programação das tolerâncias do software de cálculo por forma a especificar o erro de tolerância que controla a convergência de entrada e saída de dados das variáveis utilizadas durante a simulação.

O valor aplicado em simulações de longa duração foi de 0.1 apesar do valor pré-definido no *software* ser de 0.001. Ao aplicar o valor de maior controlo na convergência de dados foi possível obter resultados mais finos mas que por outro lado impossibilitaram o desenvolvimento da simulação em períodos superiores a um mês, quer pelo tempo de simulação exigido como pelo volume elevado dos ficheiros digitais resultantes. No entanto, é possível observar na figura 4.13 e na figura 4.14 que um valor de controlo de convergência de 0.1 introduz variações elevadas na temperatura perante os valores indicados num controlo mais fino e pode induzir em erro uma correta avalia-

ção do comportamento do sistema. A redução da tolerância de convergência leva a que a grande maioria das situações onde o comportamento do sistema de climatização não tenha sido eficaz na figura 4.12 agora possam ser enquadrados como resultado do valor de toleranciamento e não da incapacidade do sistema implementado.

A figura 4.15 apresenta a temperatura registada na monozona no dia potência de pico em arrefecimento com climatização modelo. A figura 4.16 apresenta a temperatura registada na monozona no dia de potência em aquecimento mais elevada e, simultaneamente, temperatura ambiente mais baixa, com a climatização modelo.

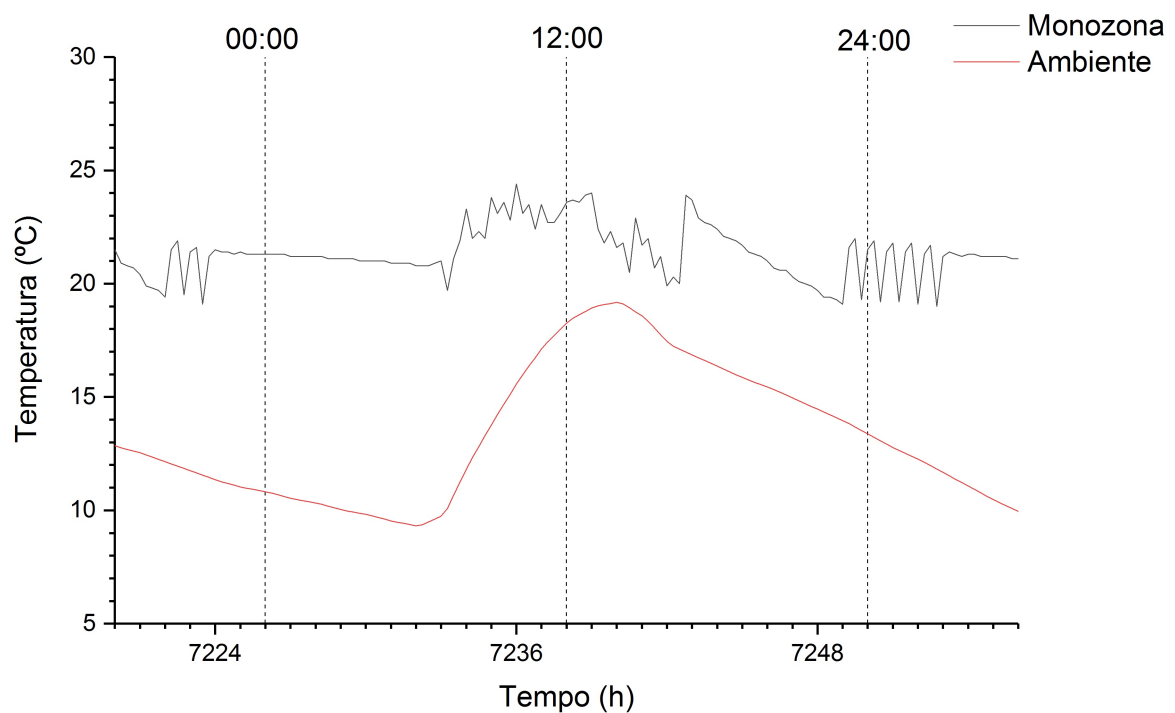


Figura 4.15: Temperatura registada na monozona no dia de potência de pico em arrefecimento com climatização modelo

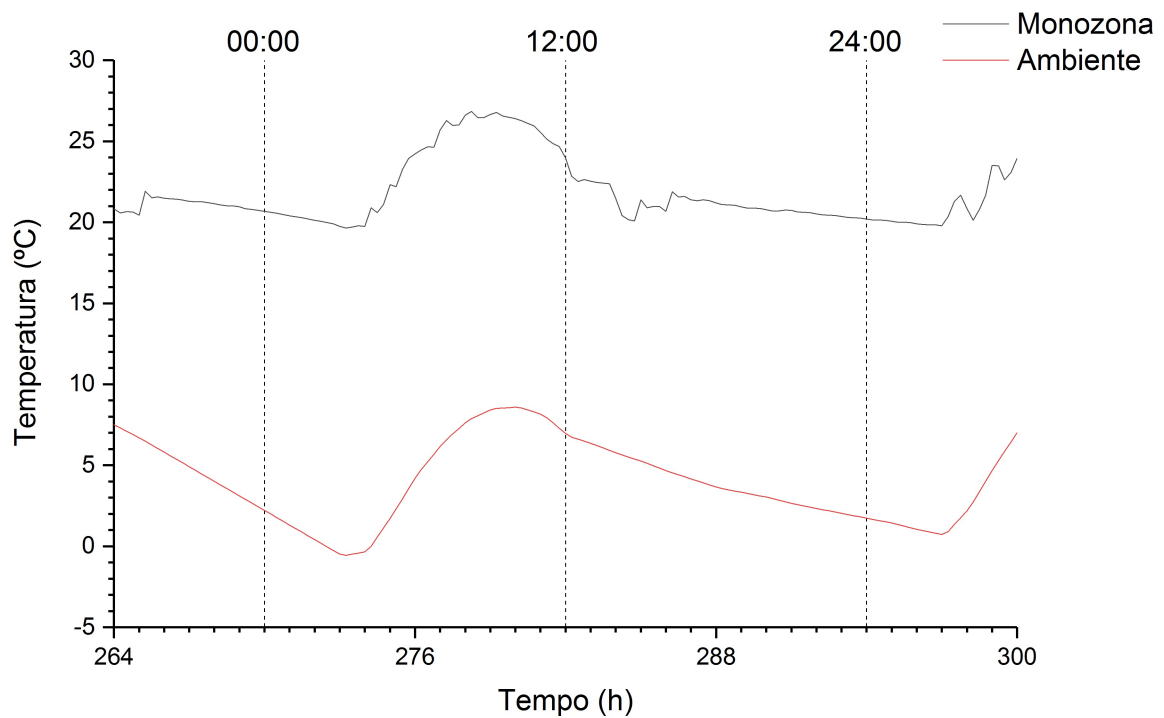


Figura 4.16: Temperatura registada na monozona no dia de potência em aquecimento mais elevada e temperatura mais baixa com climatização modelo

Ao observar a figura 4.15 é possível verificar que as temperaturas de conforto são atingidas e que o caso de arrefecimento mais exigente é passível de ser combatido. No entanto, a figura 4.16 apresenta temperaturas acima da temperatura máxima de conforto. Ao observar o comportamento do sistema na situação de máxima exigência de aquecimento, é possível verificar que o sistema apresenta condições de combate às situações de maior exigência. Contudo, neste caso específico não foram atingido os objetivos de controlo da temperatura máxima permitida. A figura 4.17 apresenta a temperatura registada na monozona no dia de temperatura mais elevada com climatização modelo.

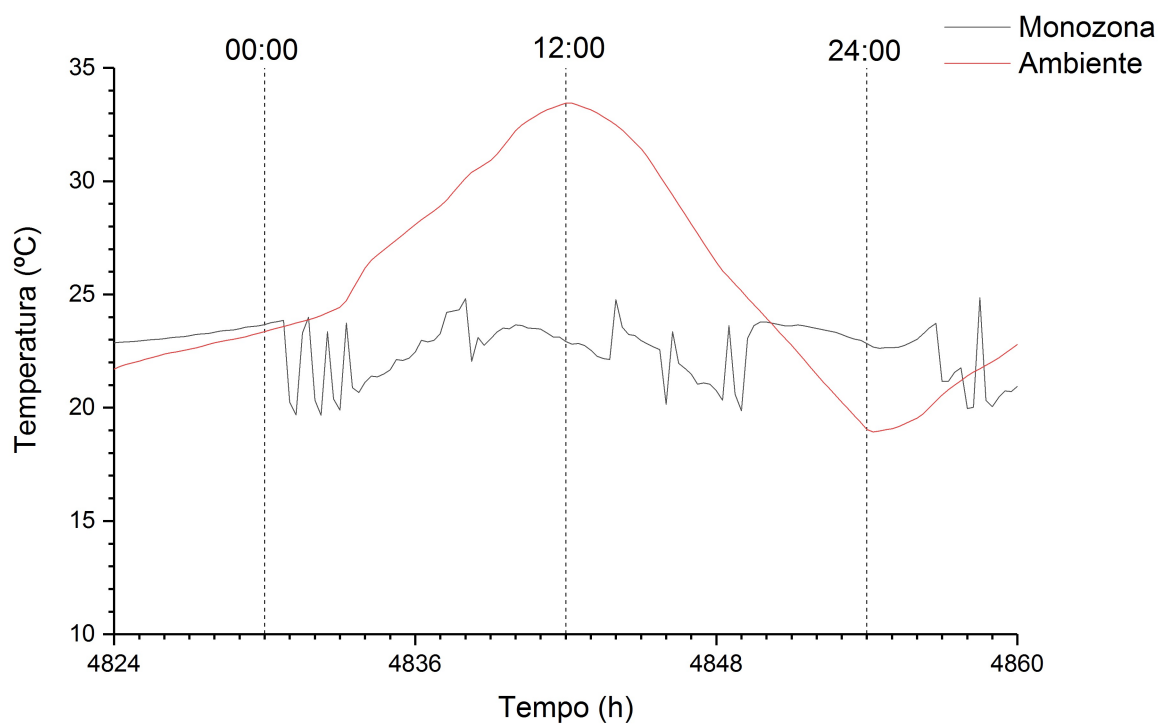


Figura 4.17: Temperatura registada na monozona no dia de temperatura mais elevada com climatização modelo

A figura 4.17 demonstra que a temperatura no interior da monozona é passível de ser controlada na situação de maior temperatura exterior. Uma vez que no caso apresentado na figura 4.16 a temperatura máxima não foi respeitada, foram avaliados os dados referentes ao ar de entrada na monozona. Por conseguinte foram obtidos os valores referentes à temperatura e caudal aplicados. A figura 4.18 apresenta a temperatura registada na entrada de ar na monozona no dia de temperatura mais baixa. A figura 4.19 apresenta a temperatura registada na entrada de ar na monozona no dia de potência de pico de arrefecimento mais elevada.

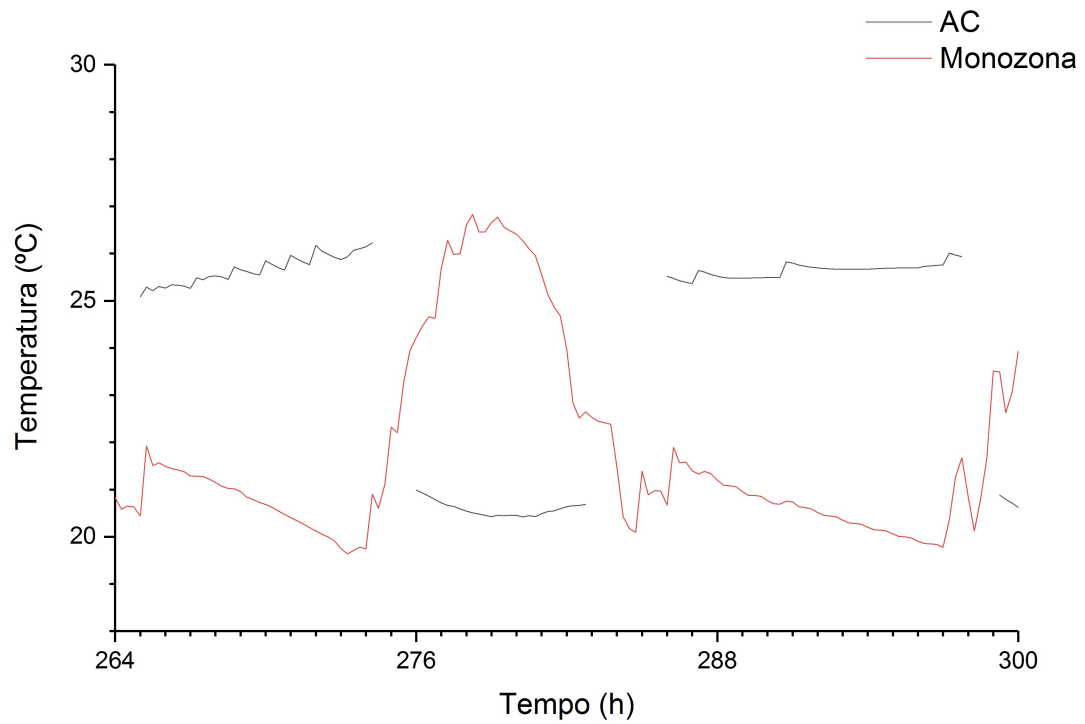


Figura 4.18: Temperatura registada na entrada de ar na monozona no dia de temperatura mais baixa

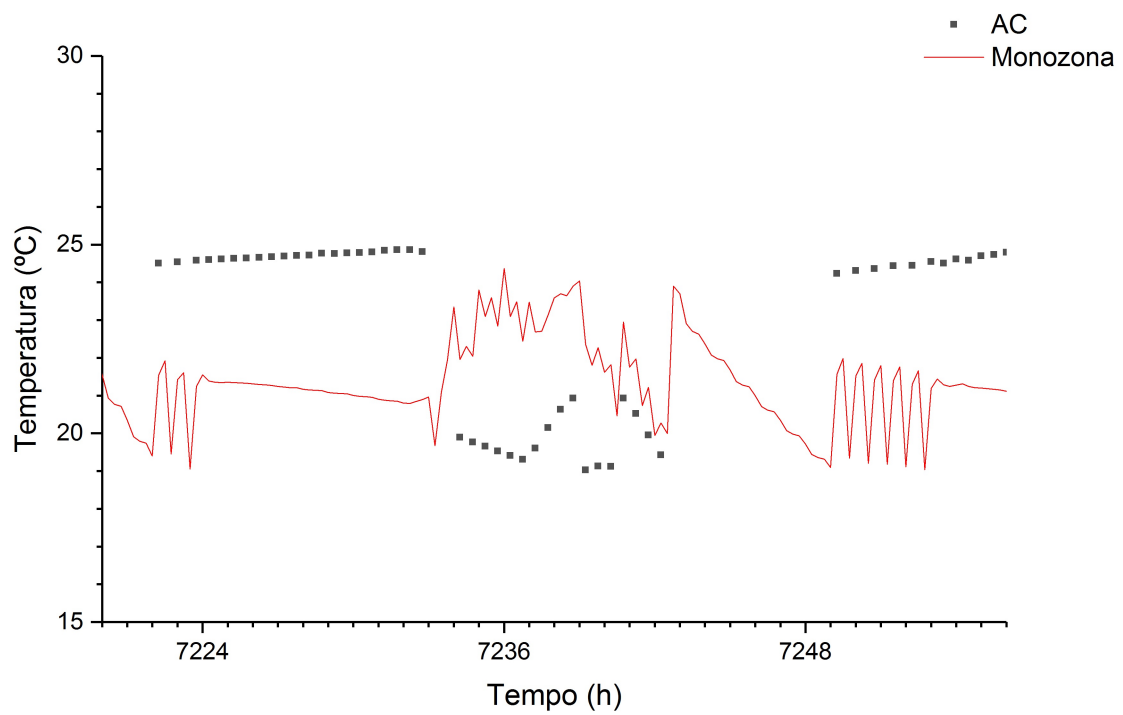


Figura 4.19: Temperatura registada na entrada de ar na monozona no dia de potência de pico de arrefecimento mais elevada

A diferença entre a forma de apresentação de resultados entre ambas as figuras (linha e dispersão) prende-se com o facto de no caso da figura 4.18 se dar uma ativação contínua do sistema e no caso da figura 4.19 a ativação ser intermitente.

Ao observar a figura 4.18 é possível verificar que as temperaturas designadas no capítulo 3.3 são respeitadas, havendo uma variação não superior a 1 °C perante o valor pretendido. Tanto no caso de aquecimento como arrefecimento a variação acontece sempre acima do valor pretendido. A figura 4.19 apresenta uma situação diferente uma vez que a variação também não ultrapassa 1°C mas em sentidos de variação diferentes. No caso de aquecimento a temperatura poderá ser considerada aceitável dentro dos objetivos propostos. Não ultrapassa o limite inferior de 24°C e mantém-se estável ao longo do dia. No entanto, observando o caso de aquecimento é possível verificar uma variação de 1 °C tanto em sentido positivo como negativo. A temperatura pretendida para arrefecimento varia entre 19 e 21 °C.

As temperaturas de arrefecimento podem ser consideradas como aceitáveis por forma a cumprir os objetivos considerados. Assim sendo será então aconselhável observar o fluxo mássico em ambos os dias considerados anteriormente. A figura 4.20 apresenta o fluxo mássico registado na entrada de ar na monozona no dia de temperatura mais baixa. A figura 4.21 apresenta o fluxo mássico registado na entrada de ar na monozona no dia de potência de pico de arrefecimento mais elevada.

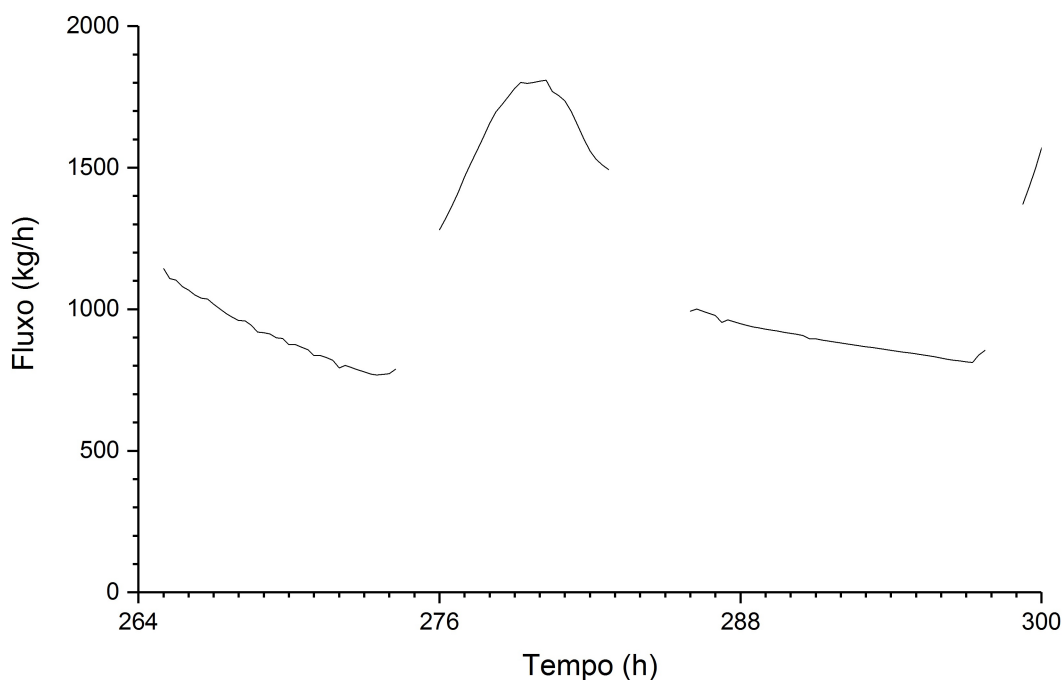


Figura 4.20: Fluxo mássico registado na entrada de ar na monozona no dia de temperatura mais baixa

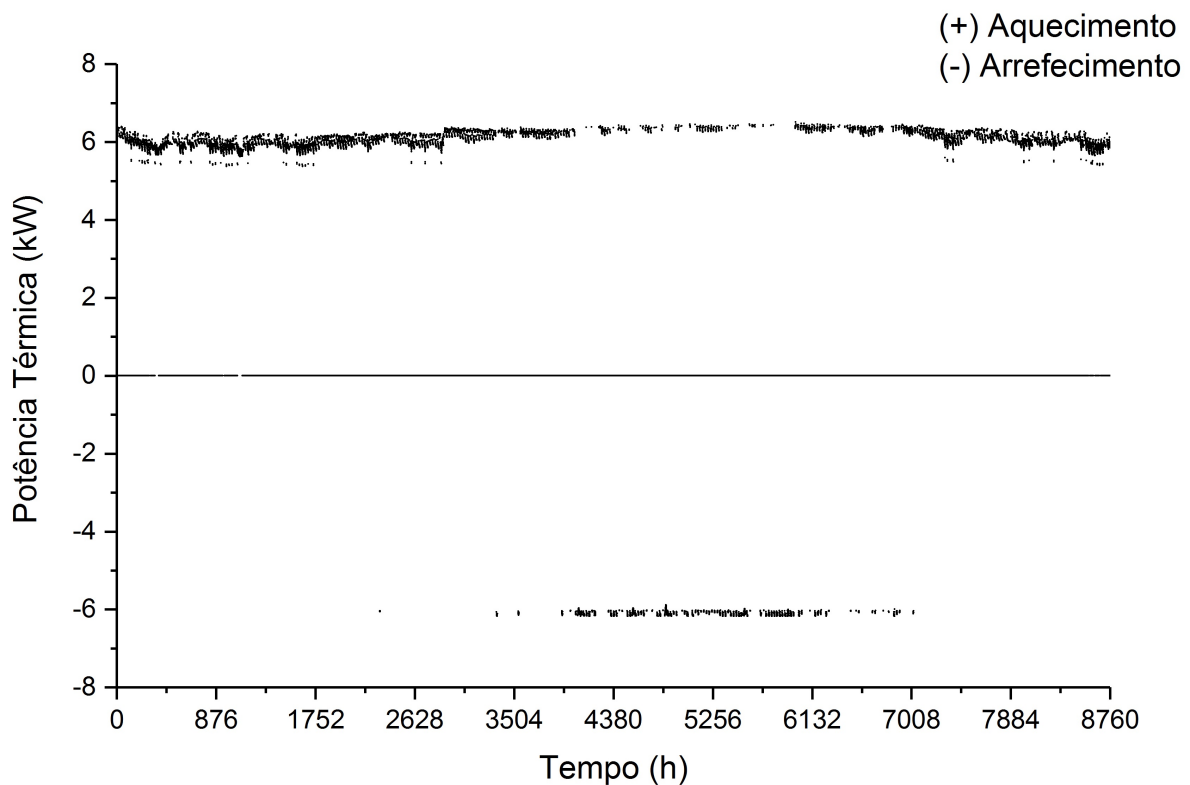


Figura 4.22: Potência térmica à saída da bomba de calor geotérmica ao longo de um ano; (+) aquecimento (-) arrefecimento

A potência térmica fornecida pela bomba de calor geotérmica apresenta-se relativamente estável ao longo de todo o ano, tanto no caso de aquecimento como arrefecimento. Tanto a potência térmica de aquecimento como arrefecimento encontra-se enquadrada em cerca de 6 kW. O valor da potência térmica debitada pela bomba de calor geotérmica é superior, tanto no caso de aquecimento como arrefecimento, relativamente à potência térmica necessária na monozona. A variação dos valores deve-se ao facto de a bomba selecionada ser a que apresentou em catálogo menor potência térmica e, de ainda ser necessário ter em atenção a eficiência do permutador de calor água ar. Os valores revelados pela figura 4.22 também se apresentam superiores aos indicados pela tabela 3.6 com os dados principais da bomba de calor. Esta variação deve-se à variação das condições de funcionamento de ambos os casos, tanto nos valores de apresentação da bomba em catálogo como as condições de funcionamento neste projeto. Ao observar os dados de funcionamento da bomba de calor tais como: a temperatura de entrada de fluido vindo da fonte, a temperatura de entrada de fluido vindo da carga e o caudal de funcionamento e comparando com os valores de catálogo é possível verificar que os valores se encontram enquadrados. A título de exemplo, a tabela 4.5 apresenta os valores de potência térmica indicados em catálogo para o intervalo de condições de funcionamento em simulação, em aquecimento. O catálogo apresenta-se no anexo B.

Tabela 4.5: Valores de potência térmica indicados em catálogo para o intervalo de condições de funcionamento da simulação, em aquecimento.

Catálogo							
Fonte (<i>Source</i>)	50 °F	10 °C	Potência Térmica (<i>HC</i>)				
Carga (<i>Load</i>)	60 °F	15.56 °C	21.2	MBTUH	6.21	kW	
	80 °F	26.67 °C	20.1		5.9		

NOTA: Fonte e carga a 5 GPM

A figura 4.23 apresenta a potência elétrica consumida pela bomba geotérmica ao longo de um ano, sendo que os valores positivos referem-se à situação de aquecimento e os valores negativos à situação de arrefecimento.

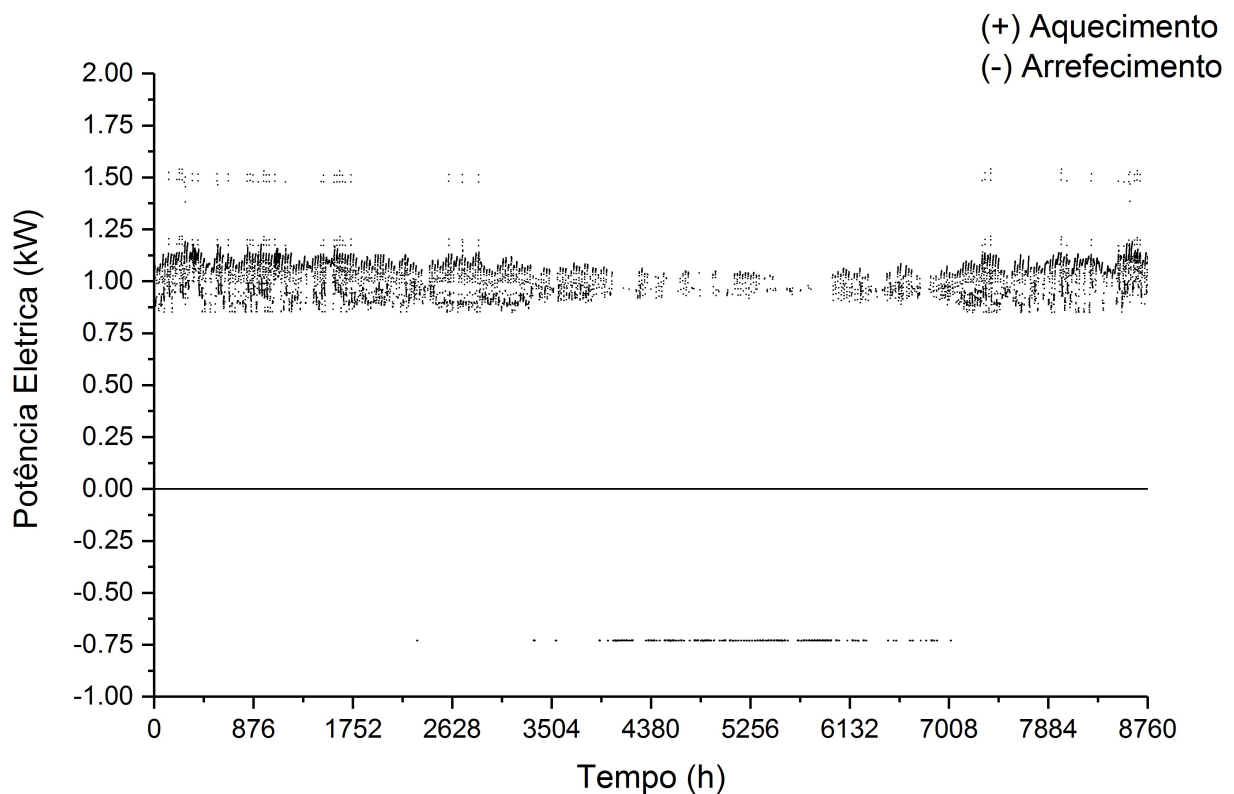


Figura 4.23: Potência elétrica consumida pela bomba de calor geotérmica ao longo de um ano; (+) aquecimento (-) arrefecimento

Ao observar a 4.23 é possível observar que a potência elétrica exigida para aquecimento não é estável e pode variar desde os 0.88 kW até 1.5 kW, sendo no entanto de realçar que os valores encontram-se maioritariamente concentrados entre 0.88kW e 1.13kW. Relativamente ao arrefecimento, a potencia eletrica exigida é estável e encontra-se sensivelmente a 0.75 kW. Ao avaliar qualitativamente o comportamento de ambos os modos de funcionamento é possível perceber que,

no modo de aquecimento existe maior variação da potência elétrica consumida que no modo de arrefecimento. Para além disso, é possível verificar também que é consumida menos potência elétrica no modo de arrefecimento comparativamente ao modo de aquecimento, ainda que ambos gerem sensivelmente a mesma potência térmica (ver figura 4.22). Os valores obtidos encontram-se enquadrados com os valores de catálogo, referentes ao intervalo de funcionamento deste projeto. A figura 4.24 apresenta os valores registados do COP da bomba geotérmica ao longo de um ano.

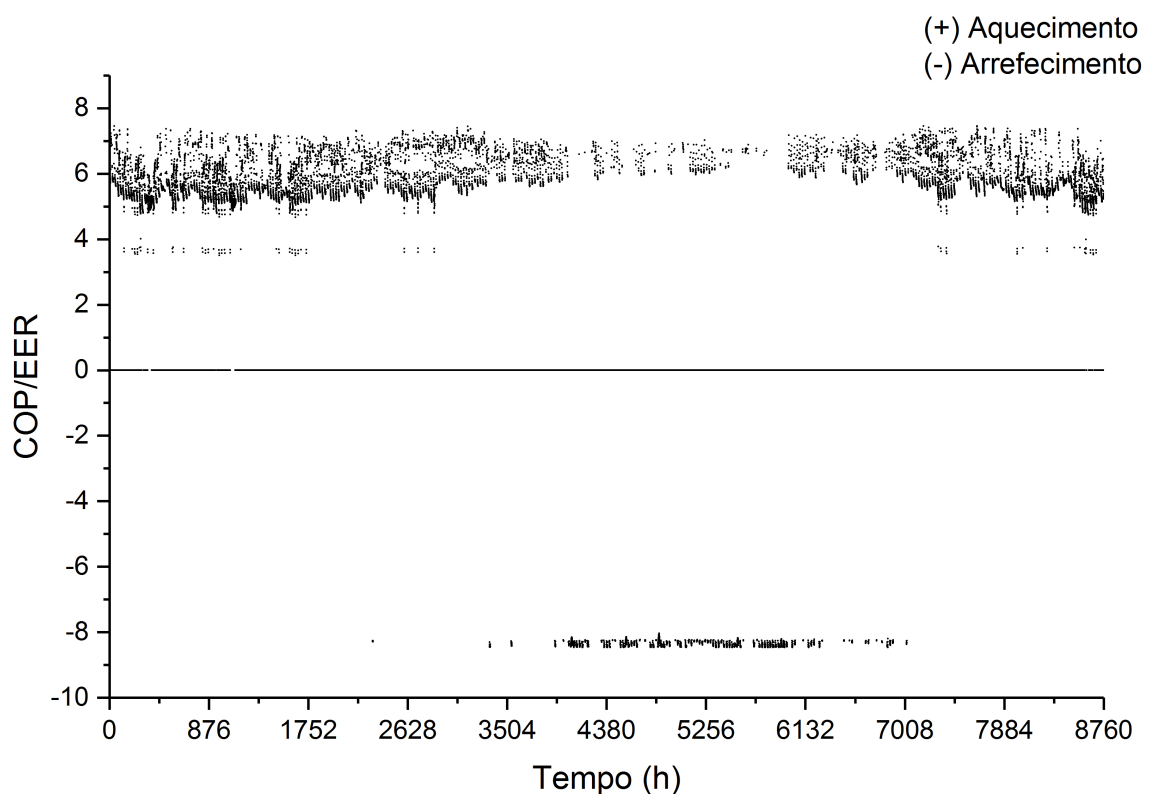


Figura 4.24: COP/EER da bomba de calor geotérmica ao longo de um ano; (+) aquecimento (-) arrefecimento

De acordo com a figura 4.24 é possível observar que o COP apresenta variação quantitativa entre 3.75 e 7. Será de realçar que a concentração de dados, neste caso, situa-se maioritariamente entre 5 e 7 valores. A menor variação encontra-se na situação dos meses de verão, onde a variação surge entre os 6 e 7 valores. Relativamente ao EER, será de notar a sua estabilidade ao longo do tempo de ativação de arrefecimento. O seu valor não apresenta relevante variação e encontra-se sensivelmente em 8 valores. O parâmetro EER encontra-se adimensional em toda a análise de resultados por forma a melhorar a observação de valores. Este valor foi obtido através da conversão das unidades para kW. A figura 4.25 apresenta o valor médio para o COP/EER.

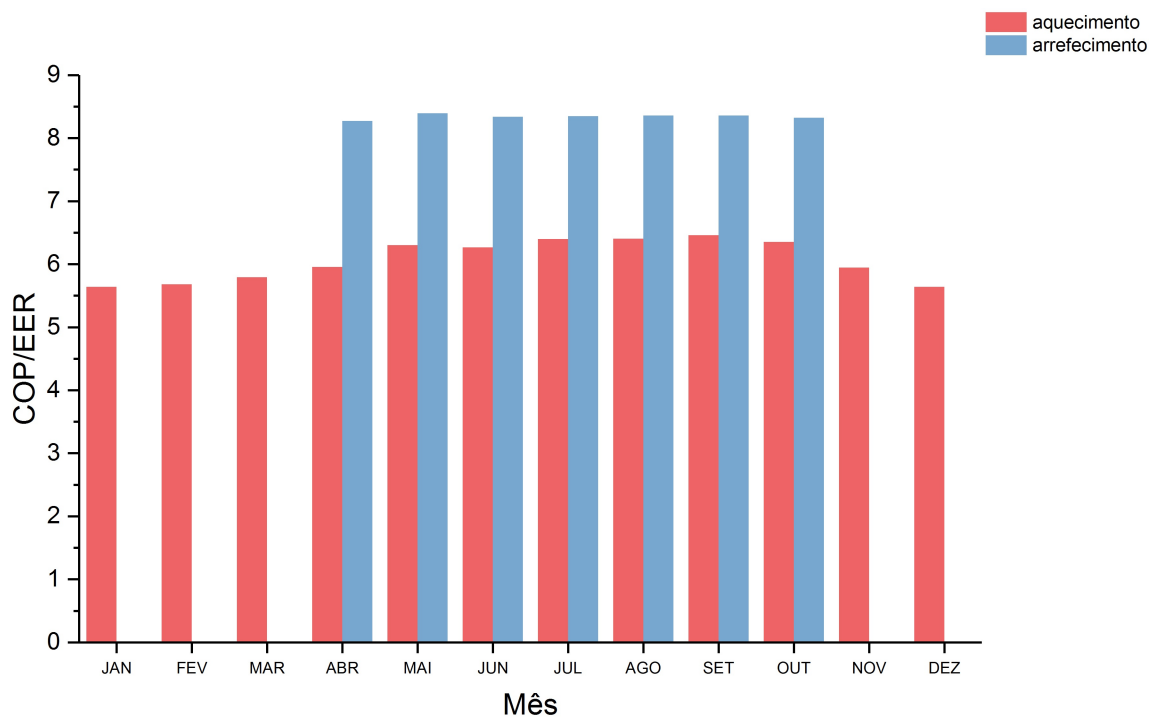


Figura 4.25: COP/EER médio mensal da bomba de calor geotérmica

Ao realizar a média de valores para cada mês do ano, é possível verificar que os meses de performance mais eficiente encontra-se na aproximação da estação de verão, com variação reduzida nesta mesma estação. Desta forma leva a crer que quanto maior é a temperatura exterior, mais eficiente será a bomba. Tal como observado nas informações relativamente à potência térmica debitada pela bomba de calor geotérmica, também o COP/EER encontram-se enquadrados nos dados fornecidos em catálogo para as condições de funcionamento da simulação. A tabela 4.6 apresenta os valores do COP indicados em catálogo para o intervalo de condições de funcionamento da simulação, em aquecimento.

Tabela 4.6: Valores de COP indicados em catálogo para o intervalo de condições de funcionamento da simulação, em aquecimento.

Catálogo				
Fonte (<i>Source</i>)	50 °F	10 °C		COP
Carga (<i>Load</i>)	60	15.56		7.41
	80 °F	26.67 °C		5.17

NOTA: Fonte e carga a 5 GPM

A figura 4.26 apresenta o valor mensal de energia elétrica consumida pela bomba de calor geotérmica.

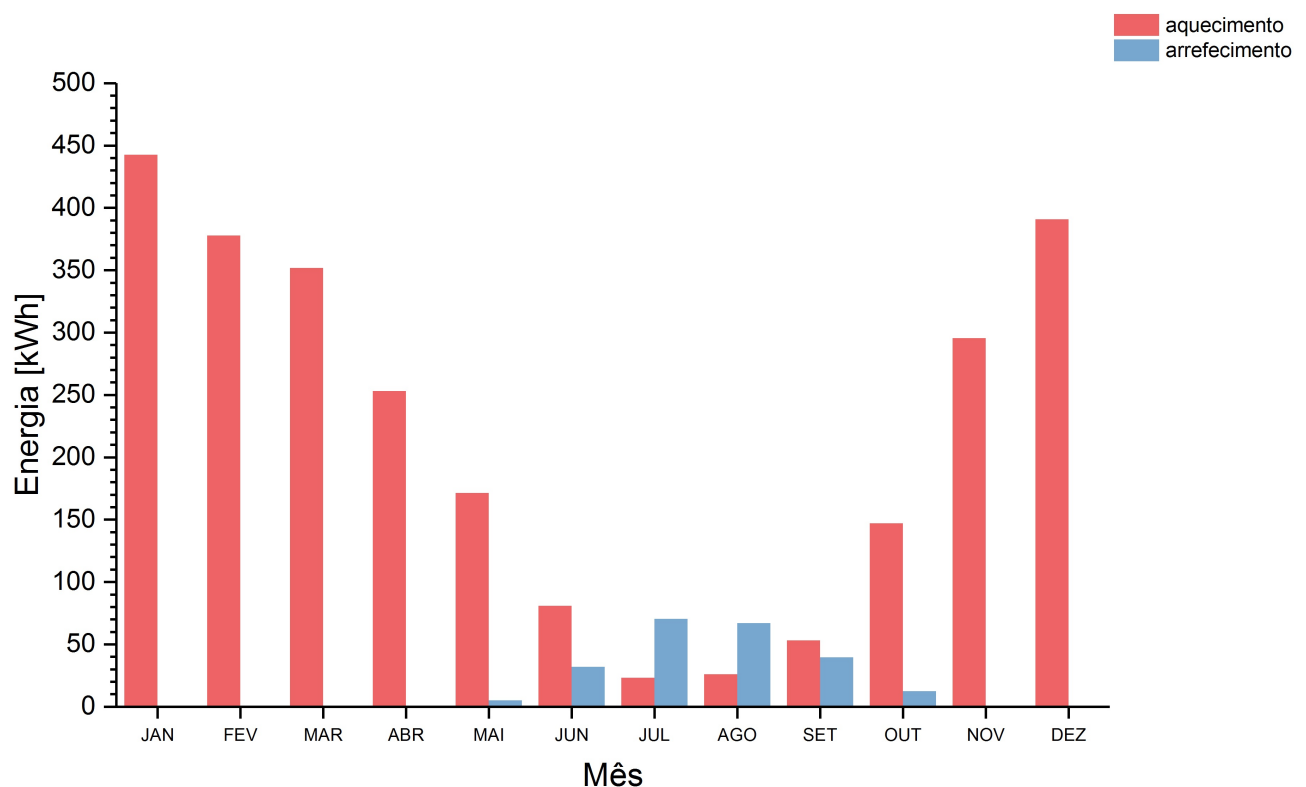


Figura 4.26: Energia elétrica mensal consumida pela bomba de calor geotérmica

A energia elétrica mensal consumida apresenta variações significativas ao longo do ano. Os meses de maior consumo encontram-se na estação de Inverno onde o consumo varia entre os 350 kWh e os 450 kWh. Os meses referentes à estação de verão, onde é solicitada maior continuidade de arrefecimento, apresentam baixo consumo. Neste caso o somatório do consumo de energia elétrica, nos casos de aquecimento e arrefecimento, não ultrapassa 150kWh.

4.2.3 Resultados referentes à temperatura do solo

A figura 4.27 apresenta a temperatura do solo, ou seja, a temperatura registada no volume definido para o permutador de calor. Para além disso também apresenta o valor da temperatura do fluido à saída do permutador de calor terrestre. A escala temporal de simulação foi de dois anos.

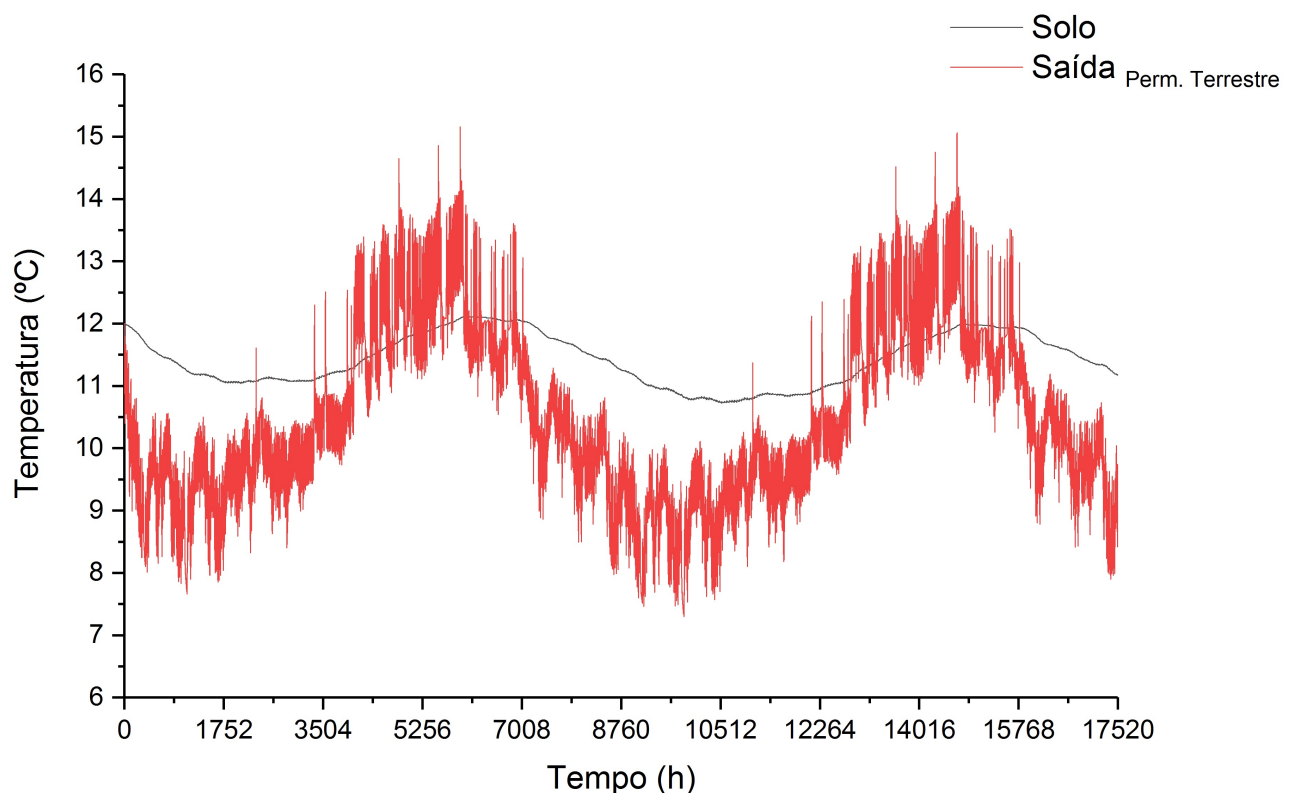


Figura 4.27: Temperatura do solo e à saída do permutador de calor terrestre ao longo de um ano

A temperatura do maciço terrestre não apresenta elevada variação ao longo dos dois anos. No entanto a temperatura à saída do permutador de calor terrestre apresenta elevada variação. Será de salientar que esta simulação foi realizada com um valor de tolerância de convergência de 0.1. Os picos de temperatura isolados evidenciados deverão ser desprezados. Os valores registados para a temperatura mínima de saída encontram-se sensivelmente a 8°C e a temperatura máxima a 15°C. As temperaturas mais elevadas são registadas nos meses de maior necessidade de arrefecimento e as temperaturas mais baixas são registadas nos meses de maior necessidade de aquecimento.

4.3 Resumo final de resultados

Por forma a obter uma percepção geral do resultado de funcionamento, estão presentes neste capítulo três tabelas resumo. A separação de resultados irá comportar as informações relevantes fornecidas pela bomba de calor geotérmica e pelo solo. E de seguida as informações sumárias referentes à monozona modelo. A tabela 4.7 apresenta os dados sumários referentes à bomba de calor geotérmica. A tabela 4.8 apresenta os resultados resumo referentes ao permutador de calor terrestre. A tabela 4.9 apresenta os resultados sumários referentes à monozona modelo.

Tabela 4.7: Tabela resumo de resultados anuais da bomba de calor geotérmica

Bomba de calor geotérmica			
COP/EER média	h	5.87	-
	c	8.35	
ENERGIA ELETRICA	h	2614.63	kWh
	c	227.49	
P _{e,média}	h	1.03	kW
	c	0.73	
P _{média}	h	6.01	kW
	c	6.10	

Tabela 4.8: Tabela resumo de resultados do permutador de calor terrestre

Permutador de calor terrestre (PC)		
Média de temperaturas anual		
T _{solo}	11.43	°C
T _{saída (fluido)}	10.49	
Permutador de Calor	Vertical	
Circuito	Fechado em série	
Nº Perfurações	2	-
Profundidade	78	m
Distancia entre perfuração	6	m
Formato	U simples	-
Diametro de tubo	32	mm
Argamassa	40% Quartzite	
	20% Bentonite	

Tabela 4.9: Tabela resumo de resultados para a monozona modelo

Monozona modelo			
T_m anual	21.79		
T_{max} (outubro)	25.67	°C	
T_{min} (janeiro)	19.64		
$P_{média}$ anual	h	0.52	kW
	c	1.17	
P_{max} (<i>TRNBuild</i>)	h	1.50	kW
	c	4.26	

O valor de temperatura máxima encontra-se enquadrado numa simulação com tolerância de convergência de 0.001 para todo o mês de outubro. O valor de temperatura mínima encontra-se enquadrado numa simulação com tolerância de convergência de 0.001 para todo o mês de janeiro.

Ao observar os valores finais de potência da bomba de calor geotérmica presentes na tabela 4.7 e comparando-os com os valores da tabela 3.11, é possível afirmar que um cálculo apenas não é suficiente para obter o comprimento ótimo de um permutador de calor terrestre. A potência da bomba de calor utilizada para o cálculo do comprimento do permutador de calor terrestre, presente na tabela 3.12, foi a potência indicada de referência para a bomba selecionada. No entanto, dadas as condições de funcionamento a que esta acaba por ser sujeita na situação de simulação, a sua potência debitada revela-se diferente. Por sua vez é originado um novo valor de referência para um novo cálculo de comprimento do permutador de calor terrestre.

Ao realizar novamente o cálculo do comprimento do permutador de calor terrestre alterando apenas os valores da potência de aquecimento e arrefecimento e o respectivo COP e EER, obtém-se os resultados presentes na tabela que se segue. No entanto deverá ser lembrado que neste caso não foi recalculado o calor de fator de carga, valor esse que está dependente da potência disponível na bomba. A tabela 4.10 apresenta o comprimento do permutador de calor terrestre considerando um redimensionamento.

Ao realizar uma breve pesquisa de mercado foi encontrada uma bomba de calor convencional (AR-AR) com uma potência térmica semelhante à bomba de calor geotérmica utilizada na simulação e comparado o desempenho financeiro num horizonte de 5 anos. A tabela 4.11 apresenta dados comparativos entre uma bomba de calor convencional e uma bomba de calor geotérmica. A seleção ocorreu de acordo com uma aproximação de potências máximas de aquecimento e arrefecimento. A consulta de dados da bomba de calor convencional apresenta-se de acordo com referido em [77].

Tabela 4.10: Comprimento do permutador de calor terrestre considerando um redimensionamento

Parametros finais de pré-dimensionamento			
Comprimento Total	Aquecimento	91	m
	Arrefecimento	144	m
Número de perfurações	2		
Comprimento/Furo	Aquecimento	45	m
	Arrefecimento	72	m
Variação Máxima Comprimento/Furo		8%	
Valores considerados da bomba de calor			
COP	Aquecimento	5.87	
	Arrefecimento	8.35	
Q	Aquecimento	6010	W
	Arrefecimento	6100	W

Tabela 4.11: Dados comparativos entre uma bomba de calor convencional e uma bomba de calor geotérmica

Bomba de calor		Geotérmica	Convencional
COP/EER	Aquecimento	5.87	3.68
	Arrefecimento	8.35	3.42
Consumo elétrico anual	Aquecimento	2614.63	4173.08
	Arrefecimento	227.49	555.48 [kW]
	Total	2842.11	4728.56
Custo	Aquecimento	639.54	1020.74
	Arrefecimento	55.64	135.87 [€]
	Total	695.18	1156.61

Energia térmica anual consumida 15300 [kW] || Preço €/kWh = 0.2446 (2018)

O valor de diferença no consumo elétrico anual é de aproximadamente 461€. A tabela 4.12 apresenta uma previsão de variação de custo a 5 anos de funcionamento em ambas as soluções. Neste caso não está considerado qualquer tipo de custo associado ao permutador de calor terrestre mas apenas uma comparação entre exclusivamente as duas bombas de calor. No caso da bomba de calor geotérmica será também de ressaltar que esta pode incluir um sistema acessório para AQS e assim conjugar também um outro investimento.

Tabela 4.12: Previsão de variação de custo a 5 anos [€]

Bomba de calor	Geotérmica	Convencional	Variação Orçamento
Custo máquina	2235.00	1600.00	-635.00
ANO 1	461.42	-	-173.58
ANO 2	922.85	-	749.27
ANO 3	1384.27	-	2133.55
ANO 4	1845.70	-	3979.25
ANO 5	3691.40	-	7670.65
Payback time	1.38	ANOS	

Na tabela apresentada anteriormente é possível verificar que o período necessário para recuperar o investimento adicional na bomba de calor geotérmica é de 1,38 anos. Neste caso é observada uma diferença de preço nas máquinas de 635€ uma variação de custo anual de eletricidade de 461,42€. A variação de orçamento apresenta a variação do fluxo monetário em caixa desde o ano zero, ou seja, momento da compra da bomba de calor, até ao ano 5 acrescentando então o valor de poupança anual relativamente ao consumo de eletricidade.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Satisfação dos Objetivos

Portugal Continental apresenta variações de solo ao longo de toda a sua extensão. Dependendo da tipologia do permutador de calor terrestre aplicado, irá variar a potencialidade da zona em análise.

O tipo de solo explorado nesta dissertação, o granito, apresenta boa capacidade de transferência térmica sendo que, de acordo com as condições aplicadas neste dissertação, a zona Centro-Ibérica apresenta potencial de aproveitamento. Para além disso, também estão presentes áreas de quartzito onde o valor de condutibilidade térmica é superior ao granito, o que poderá levar a melhores condições de aplicação. A temperatura presente a nível nacional para aproveitamento de geotermia superficial é satisfatória. Por forma a realizar com maior detalhe uma estratificação do volume de solo de simulação é necessário a realização de TRT por forma a obter uma melhor definição da tipologia do solo em maior detalhe, caso seja requerida uma localização específica.

Após pesquisa é notória a ausência de dados atualizados quanto à situação de GS, recorrente de bombas de calor geotérmicas. Não existe ainda uma plataforma de consulta acerca das bombas de calor geotérmicas presentes em território nacional. É proveitoso saber a capacidades instaladas, localizações, tipologia de permutador de calor terrestre e dados de performance do sistema geral. De momento é possível consultar a informação disponibilizada pelo LNEG presente em [48], no entanto o detalhe e especificação presentes são insuficientes ao desenvolvimento mais aprofundado deste projeto no que concerne a permutadores de calor terrestres em diferentes áreas de Portugal.

A aplicação de um sistema de bomba de calor geotérmica água água por forma a realizar climatização através de AVAC apresenta maior necessidade de componentes, nomeadamente não apenas a bomba de calor geotérmica como permutadores de calor água-ar o que reduz a eficiência do sistema como um todo. O controlo de simulação é um fator preponderante na interpretação de dados resultantes da simulação. Os valores impostos de condicionamento foram satisfatoriamente garantidos, nomeadamente os valores da temperatura de conforto. A temperatura máxima registada na monozona modelo foi de 25.67 °C em outubro e a temperatura mínima foi 19.64 °C em janeiro. A bomba de calor geotérmica apresentou um COP anual de 5.87 e EER (adimensional) de

8.35. A potência térmica debitada foi satisfatória para cumprir as necessidades. O permutador de calor terrestre utilizado foi um permutador de calor vertical fechado e em série. A profundidade de perfuração seleccionada foi de 78 m e designadas duas perfurações. A temperatura do solo manteve-se relativamente estável.

A aproximação do setor empresarial com as empresas de softwares de simulação energética deverá ser realizada por forma serem desenvolvidos projetos de simulação específica de forma mais expedita. Por forma a aumentar o leque de aplicações energéticas e a sinergia de esforços será necessário realizar a divulgação de aplicações de geotermia superficial na comunidade portuguesa. Uma sinergia poderá ser feita tanto na tipologia de fontes energéticas presentes numa instalação como na partilha de esforço de investimento. As aplicações mais proveitosas para redes urbanas serão aqueles que utilizam permutadores de calor verticais dada a elevada necessidade de área em permutadores de calor horizontais.

5.2 Trabalho Futuro

O desenvolvimento da dissertação aqui presente e a execução de todas as fases que a compõe, permitiu não só obter algumas conclusões dignas de referência, mas também suscitou possíveis pesquisas e desenvolvimentos para novas investigações.

O desenvolvimento deste projeto levou à identificação de questões relevantes que, devido ao tempo disponível limitantes à maior exploração desta dissertação, devem ser apresentadas e propostas para desenvolvimentos futuros. Desta forma, seguem-se os assuntos que pela observação do autor merecem destaque:

- A realização de um modelo de edifício que permita a variação de sistemas de climatização, ou seja, um modelo que permita avaliações multidisciplinares deverá ser tido em proposta uma vez que a variação do modelo de edifício não permite uma simples transferência e eficaz avaliação direta de modelos de climatização e verificação de condições de simulação;
- O desenvolvimento de um modelo de avaliação económica de um projeto residencial de geotermia, dados os possíveis valores elevados de investimento;
- O levantamento da localização e capacidade instalada relativamente a bombas de calor geotérmicas e consequentes informações principais associadas aos seus principais constituintes;
- A simulação de uma bomba de calor geotérmica água-ar em várias localizações do país;
- Desenvolvimento de um modelo energético de simulação e o desenvolvimento de uma plataforma de avaliação económica de uma rede urbana geotérmica;
- Realizar a simulação de um modelo com necessidade energética e aplicação de um "mix" de fontes energéticas, como coletores e painéis solares.

Referências

- [1] DGEG Direção Geral de Energia e Geologia. Geotermia - energia renovável em portugal. Technical report, DGEG, novembro 2017.
- [2] IEA. Energy efficiency market report 2015, oecd/iea. Technical report, International Energy Agency, novembro 2015.
- [3] UNEP-SBCI. Buildings and climate change: Summary for decision-makers. Technical report, United Nations Environmental Programme, Sustainable Buildings and Climate Initiative, Paris, 2009.
- [4] Eurostat. Energy consumption in households, março 2018. Disponível em http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households.
- [5] Acórdão do tribunal constitucional n.º 315/2014, maio 2014.
- [6] M.C. Lourenço. Recursos geotérmicos de baixa entalpia em portugal continental. pages 833–836. 4º Congresso da Água, LISBOA, dezembro 2014.
- [7] E. C. Ramalho. O papel do atlas geotérmico nacional no fomento da exploração da energia geotérmica em portugal continental. *Comunicações Geológicas*, pages 833–836, dezembro 2014.
- [8] Jesús Matilla Pérez, Íñigo Arrizabalaga, and Pilar Navarro Rivero. *Manual de Geotermia de Canarias, Documento 1*. Gobierno de Canarias - Dirección General de Industria y Energía, 1st edition, fevereiro 2018.
- [9] I. W. Johnston, G. A. Narsilio, and S. Colls. Emerging geothermal energy technologies. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4):643–653, Abril 2011.
- [10] G Llopis Trillo and Vicente Rodrigo Angulo. *Guía de la Energía Geotérmica*. Dirección General de Industria, Energía y Minas - Comunidad de Madrid, 1st edition, fevereiro 2008.
- [11] H. Gupta and S. Roy. *Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century*. Elsevier Science, 1st edition, 2007.
- [12] J.W. and Lund. Characteristics, development and utilization of geothermal resources. *GHC BULLETIN*, pages 1–9, junho 2007.
- [13] C. Tomasini-Montenegro, E. Santoyo-Castelazo, E. Gujba, R.J. Romero, and E. Santoyo. Life cycle assessment of geothermal power generation technologies: An updated review. *Applied Thermal Engineering*, 114:1119–1136, março 2017.

- [14] S.-M. Lu. A global review of enhanced geothermal system (egs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2):2902–2921, january 2018.
- [15] Kewen Li, Huiyuan Bian, Changwei Liu, Danfeng Zhang, and Yanan Yang. Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:1464–1474, novembro 2014.
- [16] Stuart J. Self, Bale V. Reddy, and Marc A. Rosen. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101:341–348, janeiro 2013.
- [17] EGEC. 2016 egec geothermal heat pumps. Technical report, European Geothermal Energy Council, dezembro 2017.
- [18] Rubén Munguía Rivas. *CONSTRUYE 2020 - Instalaciones de geotermia*. Fundación Laboral de la Construcción, 1st edition, março 2016.
- [19] S.J. Rees. 1 - an introduction to ground-source heat pump technology. In Simon J. Rees, editor, *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, pages 1–25. Woodhead Publishing, 2016.
- [20] S. Naicker. *Performance Analysis of a Large-Scale Ground Source Heat Pump System*. PhD thesis, Montfort University, Leicester, UK, 7 2016.
- [21] A. Choudhury. Hvac vs geothermal heat pump—myth and truth. *Open Journal of Energy Efficiency*, pages 42–45, 2013.
- [22] Brian P. Leyde, Sanford A. Klein, Gregory F. Nellis, and Harrison Skye. Determination of vertical borehole and geological formation properties using the crossed contour method. *Geothermics*, 66:174–182, março 2017.
- [23] C.K. Lee. Effects of multiple ground layers on thermal response test analysis and ground-source heat pump simulation. *Applied Energy*, 88:4405–4410, dezembro 2011.
- [24] J. Hanova and H. Dowlatabadi. Strategic ghg reduction through the use of ground source heat pump technology. *Environmental Research Letters*, 2:1–8, novembro 1997.
- [25] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. *Guía técnica - Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*. IDAE - Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía, junho 2012.
- [26] R. M. Rivas. *Construye 2020 - Instalaciones de geotermia*. Fundación Laboral de la Construcción, março 2016.
- [27] S.J. Rees. 5 - horizontal and compact ground heat exchangers. In Simon J. Rees, editor, *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, pages 117–156. Woodhead Publishing, 2016.
- [28] S.J. Rees. Energy-related applications - chapter 34 geothermal energy. In *Heating, Ventilating and Air-Conditioning APPLICATIONS SI Edition*, pages 34.1–34.43. ASHRAE® - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2015.
- [29] Manc Y Fang Z Cui P, Li X. Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils. *Applied Energy*, 88:4113–4119, novembro 2011.

- [30] Fang Z Yang H, Cui P. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: a review of models and systems. *Applied Energy*, 87:16–27, janeiro 2010.
- [31] Y. Hamada, H. Saitoh, and M. Nakamura. Field performance of an energy pile system for space heating. *Energy and Buildings*, 39:517–524, maio 2007.
- [32] H.; Riffat S.B. Wood, C.J.; Liu. An investigation of the heat pump performance and ground temperature of a piled foundation heat exchanger system for a residential building. *Energy*, 35:4932–4940, dezembro 2010.
- [33] W. Rui, Z. Jingye, and Xiaochun. Numerical simulation for pile ground heat exchangers with spiral coils. *Journal of Beijing University - Civil Engineering and Architecture*, 2013.
- [34] D. Wang, L. Lu, W. Zhang, and P. Cui. Numerical and analytical analysis of groundwater influence on the pile geothermal heat exchanger with cast-in spiral coils. *Applied Energy*, 160:705–714, dezembro 2015.
- [35] A. M. Omer. Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:344–371, fevereiro 2008.
- [36] P F. Healy and V I. Ugursal. Performance and economic feasibility of ground source heat pumps in cold inmate. *International Journal of Energy Research*, 21:857–870, agosto 1997.
- [37] G. Ma and Q. Chai. Characteristics of an improved heat-pump cycle for cold regions. *Applied Energy*, 77:235–247, novembro 2004.
- [38] D. Freeston. Direct uses of geothermal energy 1995. *Geothermics*, 25:189–214, abril 1996.
- [39] *Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review*, Melbourne, Australia, maio 2015. In: Proceedings of the World Geothermal Congress 2015.
- [40] EurObserv’ER. Heat pumps barometer. Acedido em 2018-05-02.
- [41] EurObserv’ER. Heat pumps barometer 2016. Technical report, EurObserv’ER, 2016.
- [42] EGEC. 2016 egec geothermal market report key findings. Technical report, European Geothermal Energy Council, dezembro 2017.
- [43] Carla Lourenço and José Cruz. Os recursos geotérmicos de baixa entalpia em portugal continental e seu tipo de aproveitamento. *Boletim de Minas*, 41(2):175–186, 2006.
- [44] J. Martins de Carvalho. Recursos geotérmicos de portugal. 1º seminário da plataforma portuguesa da geotermia superficial. Technical report, LNEG, 2013.
- [45] IEA. Energy policies of iea countries portugal 2016 review. Technical report, International Energy Agency, abril 2016.
- [46] Pedamallu Raviteja, Nelson Rodrigues, and Ramiro J. J. Neves. A case study. In *Onshore and Offshore Geothermal Energy Resource Potential of Portugal*, pages 1247–1260. Geothermal Resources Council Transactions, outubro 2017.
- [47] R. Marrero Diaz, E. Ramalho, A. Costa, L Ribeiro, D. Carvalho, Rosa, and A. Correia. Avaliação do potencial geotérmico do aquífero cretácico inferior na região de lisboa. Technical report, LNEG e FCT, 2014.

- [48] Laboratorio Nacional de Energia e Geologia. Geoportal - visualizador de mapas, fevereiro 2018. Disponível em <http://geoportal.lneg.pt/geoportal/mapas/index.html>.
- [49] J.M. Carvalho, L. Coelho, J.C. Nunes, M.R. Carvalho, J. Garcia, and R. Cerdeira. Portugal country update 2015. Proceedings World Geothermal Congress 2015 - Melbourne Australia, abril 2015.
- [50] R. Shortall, B. Davidsdottir, and G. Axelsson. Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44:391–406, 2015.
- [51] Davide da Rocha Torres. Estudo da viabilidade económica da geotermia como solução energética para climatização e aquecimento de águas sanitárias em Portugal. Master's thesis, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017.
- [52] Marija Trčka and Jan L.M. Hensen. Overview of hvac system simulation. *Automation in Construction*, 19:93–99, março 2010.
- [53] Drury B. Crawley, Jon W. Hand, Michaël Kummert, and Brent T. Griffith. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4):661–673, abril 2008.
- [54] Ricardo J. L. Rodrigues. Análise de implementação de uma bomba de calor para recuperação de energia. Master's thesis, IST - Instituto Superior Técnico, Outubro 2013.
- [55] Robert H. Henninger and Michael J. Witte. Energyplus testing with ansi/ashrae standard 140-2001 (bestest). Technical report, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, California, junho 2004.
- [56] S.A. Klein, W.A. Beckman, and J.A. Duffie. *TRNSYS 17 a TRaNsient SYstem Simulation program*. Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI 53703 – U.S.A., 2012.
- [57] Hiller M. Bradley E.D. Keilholz W. Thornton W.J. Duffy, J.M. Trnsys-features and functionality, building simulation. pages 1950–1954. The organization, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, julho 2009.
- [58] J.W. Thornton, D.E. Bradley, T.P. McDowell, N.J. Blair, M.J. Duffy, N.D. LaHam, and A.V. Naik. *TESSLibs 17 - GHP Library Mathematical Reference*. TESS, 2017.
- [59] Rccte - regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios, abril 2006. Disponível em <http://www.rccte.com/>.
- [60] TRANE®. *High Efficiency Water-to-Water and Water-Source Comfort System WSHP-PRC009-EN*. American Standard Inc., 2004.
- [61] B. Whitman, B. Bill Johnson, J. Tomczyk, and E. Silberstein. *Refrigeration and Air Conditioning Technology*. Cengage Learning, 3 edition, 2012.
- [62] Waterfurnace®. *Specification Catalog 5 Series NSW - 500W11*. WATERFURNACE® Smarter from the Ground Up™, 2016.

- [63] J. R. Cullin, Jeffrey Spitler, Carla Montagud, Félix Ruiz-Calvo, Simon Rees, Selvaraj S.Naicker, Petr Konečný, and L. E. Southard. Validation of vertical ground heat exchanger design methodologies. *Science and Technology for the Built Environment*, 21:137–149, fevereiro 2015.
- [64] Mostafa H. Sharqawy, Esmail M. Mokheimer, and Hassan M. Badr. Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers. *Geothermics*, 38:271–277, junho 2009.
- [65] J. Bennet, J. Claesson, and G. Hellstrom. Multipole method to compute the conductive heat transfer to and between pipes in a composite cylinder. *Notes on Heat Transfer* 3, 3, março 1987.
- [66] J. R. Cullin, Jeffrey Spitler, Carla Montagud, Félix Ruiz-Calvo, Simon Rees, Selvaraj S.Naicker, Petr Konečný, and L. E. Southard. Validation of vertical ground heat exchanger design methodologies. *Science and Technology for the Built Environment*, 21(2):137–149, fevereiro 2015.
- [67] Alfatubo. Características gerais - alfasane. Acedido em 2018-05-02, maio 2011.
- [68] T. Kusuda and P.R. Achenbach. *Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States*, volume 71. ASHRAE Transactions, 1965.
- [69] L. A. N. Carbalho. Potential of borehole systems in portugal. Master's thesis, LuleåTekniska Universitet, 2004.
- [70] A. M. A. P. B. Colaço. Assessing the efficiency of borehole heat exchanger systems for acclimatization. Master's thesis, IST - Instituto Superior Técnico, 2015.
- [71] IPMA Instituto Português do Mar e Atmosfera. Temperatura média - Área metropolitana do porto. Acedido em 2018-05-02, maio 2011.
- [72] J.W. Thornton, D.E. Bradley, T.P. McDowell, N.J. Blair, M.J. Duffy, N.D. LaHam, and A.V. Naik. *TESS COMPONENT LIBRARIES - General Descriptions*. TESS, 2017.
- [73] Göran Hellström. *Ground heat storage : thermal analyses of duct storage systems*. PhD thesis, Mathematical Physics, Department of Physics, Lund University, janeiro 1991.
- [74] Raghdah Al-Chalabi. Thermal resistance of u-tube borehole heat exchanger system: Numerical study. Master's thesis, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester, junho 2013.
- [75] J. Bennet, J. Claesson, and G. Hellstrom. Multipole method to compute the conductive heat flows to and between pipes in a composite cylinder. *Notes on Heat Transfer*, 3, janeiro 1987.
- [76] M.L. Allan and A.J. Philippacopoulos. Ground water protection issues with geothermal heat pumps. 23:101–205, janeiro 1998.
- [77] Fujitsu. Catálogo fujitsu 2014. Acedido em 2018-10-5, <http://www.fujitsuarcondicionado.pt/split-mural-inverter-lf/> 2014.
- [78] D. Pahud. Geothermal energy and heat storage, maio 2002. SUPSI – DCT – LEEE - Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana.

Anexo A

CARACTERISTICAS CONSTRUTIVAS - CASE 600

Case 600 - Base Case Low Mass Building [55]

1.2.1 Case 600 – Base Case Low Mass Building

The basic test building (Figure 1) is a rectangular single zone (8 m wide x 6 m long x 2.7 m high) with no interior partitions and 12 m² of windows on the south exposure. The building is of lightweight construction with characteristics as described below. For further details refer to Section 5.2.1 of ANSI/ASHRAE Standard 140-2001.

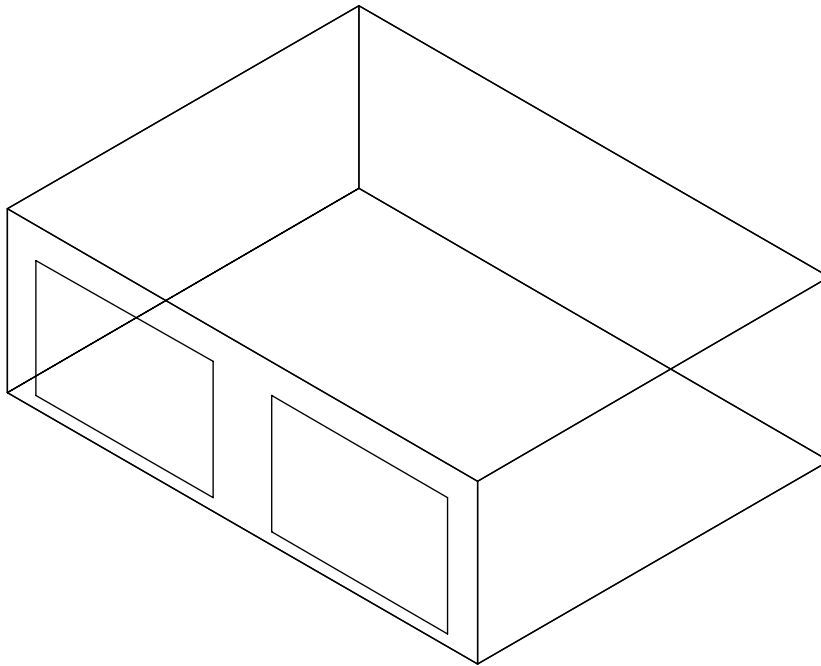


Figure 1 Base Building (Case 600) - Isometric View of Southeast Corner with Windows on South Wall

Wall Construction (light weight mass)

Element	k (W/m-K)	Thickness (m)	U (W/m ² -K)	R (m ² -K/W)	Density (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)
Int. Surface Coeff.			8.290	0.121		
Plasterboard	0.160	0.012	13.333	0.075	950	840
Fiberglass Quilt	0.040	0.066	0.606	1.650	12	840
Wood Siding	0.140	0.009	15.556	0.064	530	900
Ext. Surface Coeff.			29.300	0.034		
Overall, air-to-air			0.514	1.944		

Roof Construction (light weight mass)

Element	k (W/m-K)	Thickness (m)	U (W/m ² -K)	R (m ² -K/W)	Density (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)
Int. Surface Coeff.			8.290	0.121		
Plasterboard	0.160	0.010	16.000	0.063	950	840
Fiberglass Quilt	0.040	0.1118	0.358	2.794	12	840
Roof Deck	0.140	0.019	7.368	0.136	530	900
Ext. Surface Coat			29.300	0.034		
Overall, air-to-air			0.318	3.147		

Floor Construction (light weight mass)

Element	k (W/m-K)	Thickness (m)	U (W/m ² -K)	R (m ² -K/W)	Density (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)
Int. Surface Coeff.			8.290	0.121		
Timber Flooring	0.140	0.025	5.600	0.179	650	1200
Insulation	0.040	1.003	0.040	25.075		
Overall, air-to-air			0.039	25.374		

Window Properties

Extinction coefficient	0.0196/mm
Number of panes	2
Pane thickness	3.175 mm
Air-gap thickness	13 mm
Index of refraction	1.526
Normal direct-beam transmittance through one pane	0.86156
Thermal Conductivity of glass	1.06 W/mK
Conductance of each glass pane	333 W/m ² K
Combined radiative and convective coefficient of air gap	6.297 W/ m ² K
Exterior combined surface coefficient	21.00 W/ m ² K
Interior combined surface coefficient	8.29 W/ m ² K
U-value from interior air to ambient air	3.0 W/ m ² K
Hemispherical infrared emittance of ordinary uncoated glass	0.9
Density of glass	2500 kg/m ³
Specific heat of glass	750 J/kgK
Interior shade devices	None
Double-pane shading coefficient at normal incidence	0.907
Double-pane solar heat gain coefficient at normal incidence	0.789

There is 0.2 m of wall below the window and 0.5 m of wall above the window.

Windows are described in EnergyPlus using the Windows 5 format. Additional glass properties are required for the front side and back side. In consultation with F. Winkelmann of LBNL, it was recommended that the window described above for the ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 test be modeled as follows in EnergyPlus:

MATERIAL:WINDOWGLASS,

Glass Type 1,	!A1 [NAME] BESTEST CLEAR 1/8 IN
SpectralAverage,	!A2 [Optical data type {SpectralAverage or Spectral}]
,	!A3 [Name of spectral data set when Optical Data Type = Spectral].
	MATERIAL:WINDOWGLASS, BESTEST CLEAR 1/8 IN
0.003175,	!N1 [Thickness {m}] 1/8"
0.86156,	!N2 [Solar transmittance at normal incidence]
0.07846,	!N3 [Solar reflectance at normal incidence: front side, calc from n=1.526, Tsol=.86156]
0.07846,	!N4 [Solar reflectance at normal incidence: back side]
0.91325,	!N5 [Visible transmittance at normal incidence, scaled from Window4 ID=1]
0.08200,	!N6 [Visible reflectance at normal incidence: front side, based on Window4 ID=14]
0.08200,	!N7 [Visible reflectance at normal incidence: back side]
0.0,	!N8 [IR transmittance at normal incidence]
0.84,	!N9 [IR emittance: front side]
0.84,	!N10 [IR emittance: back side]
1.06;	!N11 [Conductivity {W/m-K}]

MATERIAL:WINDOWGAS,

Air Space Resistance, !A1 [Name] BESTEST AIR GAP 1/2 IN

AIR,	!A2 [Gas type (Air - Argon - Krypton - Xenon - SF6 - Custom)]
0.013;	!N1 [Gap width {m}] 1/2 inch

CONSTRUCTION, BESTEST DOUBLE PANE, ! Material layer names follow:

Glass Type 1,
Air Space Resistance,
Glass Type 1;

Infiltration: 0.5 air change/hour

Internal Load: 200 W continuous, 60% radiative, 40% convective, 100% sensible

Mechanical System: 100% convective air system, 100% efficient with no duct losses and no capacity limitation, no latent heat extraction, non-proportional-type dual setpoint thermostat with deadband, heating $<20^{\circ}\text{C}$, cooling $>27^{\circ}\text{C}$

Soil Temperature: 10C continuous

Anexo B

ESPECIFICAÇÕES DE CATÁLOGO DA BOMBA DE CALOR

WATER FURNACE® 5 Series NSW - 500W11 [62]

AHRI/ISO 13256-2 Performance Ratings

English (IP) Units

Model	Capacity Modulation	Flow Rate		Water Loop Heat Pump				Ground Water Heat Pump				
				Cooling 86°F Source 53.6°F Load		Heating 68°F Source 104°F Load		Cooling 59°F Source 53.6°F Load		Heating 50°F Source 104°F Load		
		Load Gpm	Source Gpm	Capacity Btuh	EER Btuh/W	Capacity Btuh	COP	Capacity Btuh	EER Btuh/W	Capacity Btuh	COP	Energy Star Compliant
018	Single	5	5	16,400	14.0	22,200	4.5	18,800	22.9	18,500	3.7	Yes
025	Single	7	7	23,700	13.6	32,800	4.6	26,700	21.2	27,100	3.8	Yes
040	Single	10	10	35,900	15.5	47,900	4.8	40,900	23.4	39,100	3.9	Yes
050	Single	15	15	49,800	13.9	65,000	4.4	55,600	21.6	54,200	3.7	Yes
060	Single	18	18	55,400	13.6	78,000	4.7	62,500	20.6	63,200	3.8	Yes
075	Single	19	19	66,000	12.3	93,100	4.2	74,100	18.0	77,100	3.5	No

Model	Capacity Modulation	Flow Rate		Ground Loop Heat Pump				
				Cooling 77°F Source 53.6°F Load		Heating 32°F Source 104°F Load		
		Load Gpm	Source Gpm	Capacity Btuh	EER Btuh/W	Capacity Btuh	COP	Energy Star Compliant
018	Single	5	5	17,300	16.6	14,700	3.1	Yes
025	Single	7	7	24,700	16.1	22,000	3.1	Yes
040	Single	10	10	37,700	17.5	30,500	3.1	Yes
050	Single	15	15	51,500	16.4	44,200	3.1	Yes
060	Single	18	18	58,000	16.1	50,100	3.1	Yes
075	Single	19	19	68,400	14.0	61,500	2.9	No

NOTE: All ratings based upon 208V operation.

01/03/12



Reference Calculations

Heating Calculations: $\text{LWT} = \text{EWT} - \frac{\text{HE}}{\text{GPM} \times \text{C}^*}$ $\text{HE} = \text{C}^* \times \text{GPM} \times (\text{EWT} - \text{LWT})$	Cooling Calculations: $\text{LWT} = \text{EWT} + \frac{\text{HR}}{\text{GPM} \times \text{C}^*}$ $\text{HR} = \text{C}^* \times \text{GPM} \times (\text{LWT} - \text{EWT})$
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

NOTE: * C = 500 for pure water, 485 for brine.

Legend and Notes

Abbreviations and Definitions

ELT = entering load fluid temperature to heat pump	kW = kilowatts
SWPD = source coax water pressure drop	EST = entering source fluid temperature to heat pump
LLT = leaving load fluid temperature from heat pump	HE = heat extracted in MBTUH
PSI = pressure drop in pounds per square inch	LST = leaving source fluid temperature from heat pump
LGPM = load flow in gallons per minute	HC = total heating capacity in MBTUH
FT HD = pressure drop in feet of head	COP = coefficient of performance, heating [HC/kW x 3.413]
LWPD = load coax water pressure drop	EER = energy efficiency ratio, cooling
LWT = leaving water temperature	TC = total cooling capacity in MBTUH
EWT = entering water temperature	HR = heat rejected in MBTUH
Brine = water with a freeze inhibiting solution	

Notes to Performance Data Tables

The following notes apply to all performance data tables:

- Three flow rates are shown for each unit. The lowest flow rate shown is used for geothermal open loop/well water systems with a minimum of 50°F EST. The middle flow rate shown is the minimum geothermal closed loop flow rate. The highest flow rate shown is optimum for geothermal closed loop systems and the suggested flow rate for boiler/tower applications.
- Entering water temperatures below 40°F assumes 15% antifreeze solution.
- Interpolation between ELT, EST, and GPM data is permissible.
- Operation in the gray areas is not recommended.

018 - Performance Data

Cooling Capacity

Source		Load Flow-3 GPM							Load Flow-4 GPM						Load Flow-5 GPM					
EST °F	Flow GPM	ELT °F	LLT °F	TC MBTUH	Power kW	HR MBTUH	EER	LST °F	LLT °F	TC MBTUH	Power kW	HR MBTUH	EER	LST °F	LLT °F	TC MBTUH	Power kW	HR MBTUH	EER	LST °F
30	3	50	37.8	17.8	0.60	19.8	29.7	43.6	40.1	18.1	0.61	20.1	29.8	43.8	42.5	18.3	0.61	20.4	30.0	44.0
		70	56.8	19.3	0.59	21.3	32.5	44.6	59.3	19.4	0.60	21.5	32.6	44.8	61.9	19.6	0.60	21.6	32.7	44.9
		90	75.8	20.7	0.59	22.7	35.3	45.6	78.6	20.8	0.59	22.8	35.4	45.7	81.4	20.9	0.59	22.9	35.4	45.7
		110	94.7	22.2	0.58	24.2	38.3	46.6	97.8	22.2	0.58	24.2	38.3	46.6	100.8	22.2	0.58	24.2	38.3	46.6
	4	50	37.7	18.0	0.58	19.9	30.9	40.9	40.0	18.2	0.58	20.2	31.2	41.1	42.4	18.4	0.59	20.4	31.5	41.2
		70	56.7	19.3	0.57	21.3	33.8	41.7	59.3	19.5	0.57	21.4	34.0	41.8	61.9	19.6	0.58	21.6	34.1	41.9
		90	75.8	20.7	0.56	22.6	36.7	42.4	78.6	20.8	0.56	22.7	36.8	42.5	81.4	20.9	0.57	22.8	36.9	42.5
		110	94.9	22.0	0.56	23.9	39.6	43.2	97.9	22.1	0.56	23.9	39.7	43.2	100.9	22.1	0.56	24.0	39.8	43.2
	5	50	37.6	18.1	0.56	20.0	32.3	38.3	40.0	18.3	0.56	20.2	32.7	38.3	42.4	18.5	0.56	20.4	33.0	38.4
		70	56.7	19.3	0.55	21.2	35.2	38.7	59.3	19.5	0.55	21.4	35.5	38.8	61.9	19.7	0.55	21.5	35.8	38.9
		90	75.9	20.6	0.54	22.4	38.1	39.2	78.6	20.7	0.54	22.5	38.3	39.3	81.4	20.8	0.54	22.7	38.6	39.4
		110	95.0	21.8	0.53	23.6	41.1	39.7	98.0	21.9	0.53	23.7	41.3	39.8	100.9	22.0	0.53	23.8	41.5	39.8
50	3	50	38.4	16.9	0.80	19.6	22.9	63.4	40.5	17.3	0.80	20.0	23.3	63.8	42.7	17.8	0.80	20.5	23.7	64.1
		70	56.3	19.9	0.80	22.6	26.5	65.5	58.9	20.2	0.80	22.9	26.8	65.8	61.5	20.6	0.80	23.3	27.2	66.0
		90	74.3	22.9	0.80	25.6	30.1	67.6	77.3	23.1	0.79	25.8	30.4	67.8	80.4	23.4	0.79	26.1	30.7	67.9
		110	92.2	25.9	0.80	28.6	33.8	69.7	95.7	26.1	0.79	28.8	34.0	69.8	99.2	26.2	0.79	28.9	34.2	69.9
	4	50	38.3	17.0	0.77	19.6	22.0	60.8	40.5	17.4	0.77	20.0	22.6	61.0	42.6	17.8	0.77	20.5	23.1	61.2
		70	56.3	19.9	0.77	22.5	26.0	62.4	58.9	20.3	0.76	22.9	26.5	62.6	61.5	20.6	0.76	23.2	27.0	62.8
		90	74.3	22.9	0.76	25.5	30.2	64.0	77.3	23.1	0.76	25.7	30.5	64.2	80.4	23.4	0.76	25.9	30.9	64.3
		110	92.2	25.9	0.75	28.4	34.4	65.7	95.7	26.0	0.75	28.6	34.6	65.7	99.2	26.1	0.75	28.7	34.8	65.8
	5	50	38.2	17.1	0.75	19.7	24.7	58.1	40.4	17.5	0.75	20.0	25.3	58.3	42.6	17.9	0.74	20.4	25.9	58.4
		70	56.3	20.0	0.74	22.5	28.8	59.3	58.9	20.3	0.73	22.8	29.2	59.4	61.5	20.6	0.73	23.1	29.7	59.5
		90	74.3	22.9	0.72	25.4	33.0	60.5	77.3	23.1	0.72	25.6	33.3	60.5	80.4	23.3	0.72	25.8	33.6	60.6
		110	92.3	25.8	0.71	28.2	37.3	61.6	95.8	25.9	0.71	28.3	37.5	61.7	99.3	26.1	0.71	28.5	37.7	61.7
70	3	50	39.1	15.9	0.99	19.3	16.1	83.3	41.0	16.6	0.99	19.9	16.7	83.7	42.9	17.2	0.99	20.6	17.4	84.1
		70	55.9	20.5	1.00	23.9	20.5	86.4	58.5	21.0	1.00	24.4	21.1	86.8	61.1	21.5	0.99	24.9	21.7	87.1
		90	Operation not recommended																	
		110	Operation not recommended																	
	4	50	39.0	16.0	0.97	19.3	16.6	80.6	40.9	16.6	0.96	19.9	17.3	80.9	42.9	17.3	0.96	20.5	18.1	81.3
		70	55.9	20.6	0.96	23.8	21.4	83.1	58.5	21.1	0.96	24.3	22.0	83.4	61.1	21.6	0.95	24.8	22.6	83.7
		90	Operation not recommended																	
		110	Operation not recommended																	
	5	50	38.9	16.1	0.94	19.3	17.1	78.0	40.9	16.7	0.93	19.9	18.0	78.2	42.9	17.3	0.92	20.4	18.8	78.4
		70	55.8	20.7	0.92	23.8	22.4	79.8	58.5	21.1	0.92	24.2	23.0	80.0	61.1	21.6	0.91	24.7	23.7	80.2
		90	Operation not recommended																	
		110	Operation not recommended																	
90	3	50	40.4	14.0	1.30	18.4	11.8	102.7	42.1	14.5	1.30	19.0	12.3	103.0	43.8	15.1	1.30	19.5	12.7	103.4
		70	57.4	18.3	1.30	22.7	15.3	105.6	59.8	18.7	1.30	23.2	15.7	105.9	62.1	19.2	1.30	23.6	16.1	106.2
		90	Operation not recommended																	
		110	Operation not recommended																	
	4	50	40.3	14.1	1.27	18.4	11.2	100.1	42.0	14.6	1.26	19.0	11.6	100.4	43.8	15.2	1.26	19.5	12.0	100.7
		70	57.3	18.4	1.26	22.7	14.6	102.5	59.7	18.9	1.26	23.1	15.0	102.7	62.0	19.3	1.26	23.6	15.4	103.0
		90	Operation not recommended																	
		110	Operation not recommended																	
	5	50	40.2	14.3	1.24	18.5	12.6	97.6	42.0	14.8	1.23	18.9	13.2	97.8	43.7	15.3	1.23	19.4	13.7	98.0
		70	57.2	18.6	1.22	22.7	16.6	99.4	59.6	19.0	1.21	23.1	17.1	99.5	62.0	19.4	1.21	23.5	17.5	99.7
		90	Operation not recommended																	
		110	Operation not recommended																	
110	3	50	41.7	12.1	1.60	17.6	7.6	122.1	43.2	12.5	1.61	18.0	7.8	122.4	44.7	12.9	1.61	18.4	8.0	122.6
		70	59.0	16.1	1.60	21.5	10.0	124.8	61.0	16.5	1.60	21.9	10.3	125.1	63.1	16.8	1.61	22.3	10.5	125.3
		90	Operation not recommended																	
		110	Operation not recommended																	
	4	50	41.6	12.3	1.57	17.6	7.8	119.7	43.1	12.7	1.57	18.0	8.1	119.9	44.6	13.1	1.57	18.4	8.3	120.1
		70	58.8	16.3	1.56	21.6	10.5	121.9	60.9	16.6	1.56	22.0	10.7	122.1	63.0	17.0	1.56	22.3	10.9	122.3
		90	Operation not recommended																	
		110	Operation not recommended																	
	5	50	41.5	12.4	1.53	17.6	8.1	117.3	43.0	12.8	1.53	18.0	8.4	117.4	44.6	13.2	1.53	18.4	8.6	117.6
		70	58.7	16.5	1.51	21.6	10.9	118.9	60.8	16.8	1.51	22.0	11.1	119.1	62.9	17.2	1.51	22.4	11.4	119.2
		90	Operation not recommended																	
		110	Operation not recommended																	

018 - Performance Data cont.

Heating Capacity

Source		Load Flow-3 GPM							Load Flow-4 GPM						Load Flow-5 GPM					
EST °F	Flow GPM	ELT °F	LLT °F	HC MBTUH	Power kW	HE MBTUH	COP	LST °F	LLT °F	HC MBTUH	Power kW	HE MBTUH	COP	LST °F	LLT °F	HC MBTUH	Power kW	HE MBTUH	COP	LST °F
25	4	60																		
		80																		
		100																		
		120																		
	5	60	69.8	14.2	0.90	11.1	4.62	20.4	67.4	14.3	0.88	11.3	4.76	20.3	65.9	14.4	0.86	11.5	4.91	20.3
		80	89.4	13.7	1.21	9.6	3.31	21.1	87.1	13.8	1.19	9.7	3.38	21.0	85.7	13.9	1.17	9.9	3.46	20.9
		100	109.1	13.2	1.53	8.0	2.53	21.7	106.8	13.3	1.51	8.1	2.58	21.6	105.5	13.3	1.49	8.3	2.63	21.6
		120	128.7	12.7	1.84	6.4	2.02	22.4	126.6	12.8	1.82	6.5	2.05	22.3	125.3	12.8	1.80	6.7	2.08	22.3
30	3	60	70.4	15.1	0.91	12.0	4.86	21.8	68.3	15.2	0.90	12.1	4.96	21.7	66.3	15.2	0.88	12.2	5.06	21.6
		80	90.0	14.5	1.22	10.4	3.48	22.9	88.0	14.6	1.21	10.5	3.55	22.8	86.0	14.6	1.19	10.6	3.61	22.7
		100	109.6	14.0	1.54	8.7	2.66	24.0	107.7	14.0	1.52	8.8	2.71	23.9	105.8	14.1	1.49	9.0	2.76	23.8
		120	129.2	13.4	1.85	7.1	2.12	25.1	127.4	13.5	1.83	7.2	2.16	25.0	125.6	13.5	1.80	7.4	2.20	24.9
	4	60	70.7	15.5	0.91	12.4	5.02	23.2	68.6	15.6	0.89	12.6	5.14	23.2	66.5	15.7	0.88	12.7	5.26	23.1
		80	90.2	14.9	1.22	10.7	3.58	24.2	88.2	15.0	1.20	10.9	3.66	24.1	86.2	15.0	1.18	11.0	3.75	24.0
		100	109.8	14.3	1.53	9.0	2.73	25.1	107.9	14.3	1.50	9.2	2.79	25.0	105.9	14.4	1.48	9.3	2.85	24.9
		120	129.4	13.7	1.85	7.4	2.17	26.0	127.5	13.7	1.81	7.5	2.21	25.9	125.6	13.7	1.78	7.6	2.26	25.8
	5	60	70.9	15.9	0.90	12.8	5.18	24.7	68.8	16.1	0.89	13.0	5.32	24.6	66.7	16.2	0.87	13.2	5.46	24.5
		80	90.5	15.2	1.21	11.1	3.68	25.4	88.4	15.3	1.19	11.3	3.78	25.3	86.4	15.4	1.16	11.5	3.89	25.3
		100	110.0	14.6	1.53	9.4	2.80	26.1	108.0	14.6	1.49	9.5	2.87	26.1	106.0	14.7	1.46	9.7	2.95	26.0
		120	129.6	13.9	1.84	7.6	2.21	26.9	127.6	13.9	1.80	7.8	2.27	26.8	125.7	13.9	1.75	7.9	2.33	26.7
50	3	60	73.5	19.7	0.90	16.6	6.46	38.6	70.9	19.8	2.74	10.4	4.71	42.8	68.2	20.0	4.59	4.3	2.97	47.1
		80	93.0	18.9	1.21	14.7	4.58	39.9	90.4	19.0	2.43	10.7	3.48	42.7	87.9	19.1	3.65	6.6	2.37	45.4
		100	112.4	18.1	1.52	12.9	3.48	41.2	110.0	18.1	2.12	10.9	2.85	42.5	107.5	18.2	2.71	9.0	2.21	43.8
		120	131.9	17.3	1.84	11.0	2.76	42.4	129.5	17.3	1.80	11.1	2.82	42.3	127.2	17.4	1.77	11.3	2.88	42.2
	4	60	73.9	20.2	0.89	17.1	6.62	40.7	71.2	20.4	1.81	14.2	3.31	42.7	68.5	20.6	2.72	11.3	2.22	44.8
		80	93.3	19.3	1.21	15.2	4.69	41.7	90.7	19.5	1.80	13.3	3.16	43.0	88.1	19.6	2.40	11.4	2.40	44.4
		100	112.7	18.4	1.52	13.2	3.55	42.8	110.2	18.5	1.80	12.4	3.02	43.4	107.7	18.6	2.08	11.5	2.63	44.0
		120	132.1	17.6	1.83	11.3	2.81	43.8	129.7	17.6	1.80	11.5	2.87	43.7	127.3	17.7	1.76	11.7	2.94	43.6
	5	60	74.2	20.7	0.89	17.7	6.83	42.7	71.5	21.0	0.87	18.0	7.12	42.6	68.7	21.2	0.85	18.3	7.41	42.4
		80	93.6	19.8	1.20	15.6	4.82	43.5	90.9	19.9	1.17	15.9	4.99	43.4	88.3	20.1	1.15	16.2	5.17	43.3
		100	112.9	18.8	1.52	13.6	3.64	44.4	110.4	18.9	1.48	13.9	3.75	44.3	107.8	19.0	1.45	14.1	3.87	44.2
		120	132.3	17.9	1.83	11.6	2.86	45.2	129.8	17.9	1.79	11.8	2.94	45.1	127.4	18.0	1.75	12.0	3.02	45.1
70	3	60	76.6	24.2	0.88	21.2	8.06	55.4	73.4	24.5	4.59	8.8	4.46	64.0	70.2	24.7	8.30	-3.6	0.87	72.5
		80	95.9	23.2	1.19	19.1	5.69	56.9	92.8	23.4	3.65	10.9	3.41	62.5	89.7	23.5	6.11	2.7	1.13	68.2
		100	115.2	22.1	1.51	17.0	4.30	58.3	112.2	22.3	2.72	13.0	2.99	61.1	109.2	22.4	3.93	9.0	1.67	63.8
		120	134.5	21.1	1.82	14.9	3.40	59.8	131.6	21.2	1.78	15.1	3.48	59.6	128.7	21.2	1.74	15.3	3.57	59.5
	4	60	77.1	24.9	0.88	21.8	8.27	58.1	73.8	25.2	2.72	15.9	2.71	62.2	70.5	25.5	4.56	9.9	1.64	66.4
		80	96.3	23.7	1.19	19.6	5.82	59.3	93.1	23.9	2.41	15.7	2.91	62.0	90.0	24.2	3.62	11.8	1.96	64.8
		100	115.5	22.6	1.51	17.4	4.39	60.5	112.5	22.7	2.09	15.6	3.18	61.8	109.4	22.9	2.68	13.7	2.50	63.1
		120	134.7	21.5	1.82	15.2	3.45	61.7	131.8	21.5	1.78	15.4	3.54	61.6	128.9	21.6	1.74	15.7	3.64	61.4
	5	60	77.5	25.5	0.88	22.5	8.49	60.7	74.2	25.9	0.85	22.9	8.93	60.5	70.8	26.2	0.82	23.4	9.36	60.3
		80	96.7	24.3	1.19	20.2	5.96	61.7	93.5	24.5	1.16	20.6	6.20	61.5	90.2	24.8	1.13	21.0	6.45	61.4
		100	115.8	23.0	1.51	17.9	4.48	62.6	112.7	23.2	1.47	18.2	4.63	62.5	109.6	23.4	1.43	18.5	4.78	62.4
		120	135.0	21.8	1.82	15.6	3.51	63.6	132.0	21.9	1.78	15.8	3.61	63.5	129.1	22.0	1.74	16.1	3.70	63.4
90	3	60	79.6	28.5	0.88	25.5	9.49	72.5	75.6	28.4	0.85	25.5	9.84	72.5	71.6	28.2	0.81	25.4	10.20	72.5
		80	98.6	27.1	1.18	23.0	6.70	74.2	94.9	27.1	1.15	23.1	6.92	74.1	91.1	27.0	1.11	23.2	7.14	74.0
		100																		
	4	60	80.1	29.2	0.88	26.2	9.72	75.7	76.0	29.0	0.85	26.1	10.05	75.7	71.9	28.8	0.81	26.0	10.40	75.8
		80	99.0	27.7	1.19	23.6	6.84	77.1	95.2	27.6	1.15	23.7	7.05	77.0	91.4	27.6	1.11	23.8	7.28	77.0
		100																		
		120																		
	5	60	80.5	29.9	0.88	26.9	9.96	78.9	76.3	29.6	0.85	26.7	10.28	79.0	72.1	29.3	0.81	26.5	10.60	79.1
		80	99.4	28.2	1.19	24.2	6.97	80.0	95.5	28.2	1.15	24.2	7.19	80.0	91.6	28.1	1.11	24.3	7.42	80.0
		100																		
		120																		

Anexo C

TABELAS APLICADAS NO PERMUTADOR DE CALOR TERRESTRE

C.1 FATOR DE CARGA AQUECIMENTO E ARREFECIMENTOTabela C1: *Bin hour* para a cidade do Porto - janeiro e agosto

Arrefecimento - Janeiro			Aquecimento - Agosto		
Intervalo T [°C]	Nº Horas		Intervalo T [°C]	Nº Horas	
-3	-2	0	9	10	0
-2	-1	0	10	11	0
-1	0	2	11	12	1
0	1	3	12	13	10
1	2	9	13	14	23
2	3	12	14	15	32
3	4	33	15	16	45
4	5	38	16	17	64
5	6	45	17	18	65
6	7	56	18	19	64
7	8	69	19	20	76
8	9	64	20	21	66
9	10	75	21	22	87
10	11	79	22	23	80
11	12	85	23	24	57
12	13	68	24	25	36
13	14	47	25	26	17
14	15	32	26	27	11
15	16	12	27	28	4
16	17	6	28	29	2
17	18	10	29	30	3
18	19	0	30	31	2
19	20	0	31	32	0
-	-	-	32	33	0

Tabela C2: Horas de funcionamento em arrefecimento para Agosto

T [a,b]		T _m	Carga Edifício	Potência Disponível	Fracção Funcionamento	Bin Hora	Horas Funcionamento
a	b						
15	16	15.5	0	4056	0	45	0.00
16	17	16.5	0	4056	0	64	0.00
17	18	17.5	62	4056	0.015	65	1.00
18	19	18.5	216	4056	0.053	64	3.41
19	20	19.5	265	4056	0.065	76	4.96
20	21	20.5	518	4056	0.128	66	8.44
21	22	21.5	874	4056	0.216	87	18.75
22	23	22.5	1177	4056	0.290	80	23.22
23	24	23.5	1505	4056	0.371	57	21.16
24	25	24.5	1616	4056	0.398	36	14.34
25	26	25.5	1695	4056	0.418	17	7.11
26	27	26.5	1499	4056	0.369	11	4.06
27	28	27.5	1817	4056	0.448	4	1.79
28	29	28.5	1916	4056	0.472	2	0.94
29	30	29.5	2089	4056	0.515	3	1.55
30	31	30.5	2498	4056	0.616	2	1.23
31	32	31.5	0	4056	0	0	0.00
32	33	32.5	0	4056	0	0	0.00

Tabela C3: Horas de funcionamento em aquecimento para Janeiro

T [a,b]		T _m	Carga Edifício	Potência Disponível	Fracção Funcionamento	Bin Hora	Horas Funcionamento
a	b						
-2	-1	-1.5	0	3446	0	0	0.00
-1	0	-0.5	1487	3446	0.431	2	0.86
0	1	0.5	1051	3446	0.305	3	0.91
1	2	1.5	1262	3446	0.366	9	3.30
2	3	2.5	1218	3446	0.353	12	4.24
3	4	3.5	1043	3446	0.303	33	9.98
4	5	4.5	965	3446	0.280	38	10.64
5	6	5.5	947	3446	0.275	45	12.36
6	7	6.5	875	3446	0.254	56	14.21
7	8	7.5	687	3446	0.199	69	13.75
8	9	8.5	562	3446	0.163	64	10.43
9	10	9.5	527	3446	0.153	75	11.47
10	11	10.5	475	3446	0.138	79	10.88
11	12	11.5	412	3446	0.119	85	10.16
12	13	12.5	276	3446	0.080	68	5.44
13	14	13.5	177	3446	0.051	47	2.42
14	15	14.5	282	3446	0.082	32	2.62
15	16	15.5	0	3446	0.000	12	0.00
16	17	16.5	0	3446	0	6	0.00

C.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ARGAMASSAS

Tabela C4: Condutividade térmica de argamassas [74].

Grout and Additives	k_g (W/K.m)	Thermal Enhanced Grouts	k_g(W/K.m)
20% Bentonite	0.726	20% Bentonite-40% Quartzite	1.47
30% Bentonite	0.744	20% Bentonite-30% Quartzite	1.211-1.29
Cement Mortar	0.69-0.78	30% Bentonite-30% Iron Ore	0.78

C.3 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE ROCHAS

Tabela C5: Condutividade térmica e capacidade térmica de diferentes tipos de rocha [78].

Type de roche – <i>rock type</i>	Conductibilité thermique – <i>Thermal conductivity</i> λ (W/mK)			Capacité thermique volumétrique – <i>Volumetric thermal</i> <i>capacity</i> ρC (MJ/m³K)
	min	valeur typique	max	
Roches magmatiques – <i>Magmatic rocks</i>				
Basalte – <i>basalt</i>	1.3	1.7	2.3	2.3 – 2.6
Diorite – <i>diorite</i>	2.0	2.6	2.9	2.9
Gabbro – <i>gabbro</i>	1.7	1.9	2.5	2.6
Granit – <i>granite</i>	2.1	3.4	4.1	2.1 – 3.0
Péridotite – <i>peridotite</i>	3.8	4.0	5.3	2.7
Rhyolithe – <i>rhyolite</i>	3.1	3.3	3.4	2.1
Roche métamorphiques – <i>Metamorphous rocks</i>				
Gneiss – <i>gneiss</i>	1.9	2.9	4.0	1.8 – 2.4
Marbre – <i>marble</i>	1.3	2.1	3.1	2.0
Métaquartzite – <i>metaquartzite</i>		env. 5.8		2.1
Micaschistes – <i>micaschists</i>	1.5	2.0	3.1	2.2
Schistes argilleux – <i>argillaceous schists</i>	1.5	2.1	2.1	2.2 – 2.5
Roches sédimentaires – <i>Sedimentary rocks</i>				
Calcaire – <i>limestone</i>	2.5	2.8	4.0	2.1 – 2.4
Marne – <i>marl</i>	1.5	2.1	3.5	2.2 – 2.3
Quartzite – <i>quartzite</i>	3.6	6.0	6.6	2.1 – 2.2
Sel – <i>salt</i>	5.3	5.4	6.4	1.2
Grès – <i>sandstone</i>	1.3	2.3	5.1	1.6 – 2.8
Roches argilleuses, limoneuses – <i>claystone/siltstone</i>	1.1	2.2	3.5	2.1 – 2.4
Roches non consolidées – <i>Unconsolidated rocks</i>				
Gravier, sec – <i>gravel, dry</i>	0.4	0.4	0.5	1.4 – 1.6
Gravier, saturé d'eau – <i>gravel, watersaturated</i>		env. 1.8		env. 2.4
Moraine – <i>moraine</i>	1.0	2.0	2.5	1.5 – 2.5
Sable, sec – <i>sand, dry</i>	0.3	0.4	0.8	1.3 – 1.6
Sable, saturé d'eau – <i>sand, watersaturated</i>	1.7	2.4	5.0	2.2 – 2.9
Argile/limon, sec – <i>clay/silt, dry</i>	0.4	0.5	1.0	1.5 – 1.6
Argile/limon, saturé d'eau – <i>clay/silt, watersaturated</i>	0.9	1.7	2.3	1.6 – 3.4
Tourbe – <i>peat</i>	0.2	0.4	0.7	0.5 – 3.8
Autres substances – <i>Other substances</i>				
Bentonite – <i>bentonite</i>	0.5	0.6	0.8	env. 3.9
Béton – <i>concrete</i>	0.9	1.6	2.0	env. 1.8
Glace (-10°C) – <i>ice (-10°C)</i>		2.32		1.87
Plastique (PE) – <i>plastic (PE)</i>		0.39		-
Air (0-20°C, sec) – <i>air (0-20°C, dry)</i>		0.02		0.0012
Acier – <i>steel</i>		60		3.12
Eau (+10 °C) – <i>water (+10 °C)</i>		0.58		4.19